

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

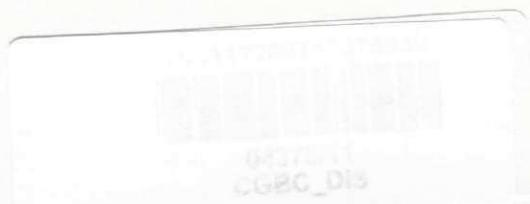
SHIRLENE KELLY SANTOS CARMO



**IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMA EM UMA UNIDADE DE COMPRESSÃO DE
CLORO**

CAMPINA GRANDE

Novembro/2010



SHIRLENE KELLY SANTOS CARMO

**IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMA EM UMA UNIDADE DE COMPRESSÃO DE
CLORO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientador: Luis Gonzaga Sales Vasconcelos

Campina Grande
Novembro/2010



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

C287i Carmo, Shirlene Kelly Santos.

Identificação de sistema em uma unidade de compressão de cloro / Shirlene Kelly Santos Carmo. — Campina Grande, 2010.

75 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientador: Prof^o. Dr. Luis Gonzaga Sales Vasconcelos.

1. Identificação de sistema. 2. Tricloroamina. 3. Degradação. 4. Controle. 5. Dinâmica I. Título.

CDU – 661.417(043)

SHIRLENE KELLY SANTOS CARMO

**IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMA EM UMA UNIDADE DE COMPRESSÃO DE
CLORO**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Campina Grande como
requisito para obtenção do título de mestre
em Engenharia Química.

Orientador: Luis Gonzaga Sales
Vasconcelos

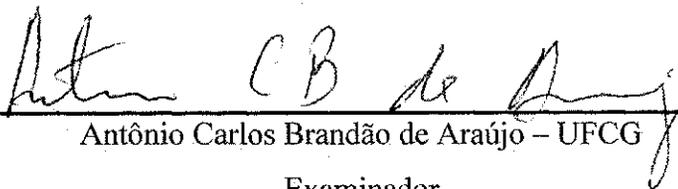
Aprovado em 5 de 11 de 10.

BANCA EXAMINADORA



Fernando Fernandes Vieira – UEPB

Examinador



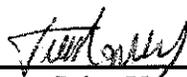
Antônio Carlos Brandão de Araújo – UFCG

Examinador



Romildo Pereira Brito – UFCG

Examinador



Luis Gonzaga Sales Vasconcelos – UFCG

Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, luz e perseverança que me proporcionou, para que eu não desistisse de continuar, apesar das dificuldades sofridas, por ser uma área de estudo bastante diferente da que eu já havia trabalhado antes, em projetos de pesquisa.

Agradeço ao meu orientador Professor Luis Vasconcelos pela paciência, dedicação, acompanhamento e orientação em todos os momentos em que o procurei.

Aos meus pais José Gilberto e Maria de Fátima, por terem me proporcionado as coisas que mais prezo na vida: o amor, carinho, respeito e educação.

Aos meus irmãos, que sempre confiaram no meu potencial, e me deram força para prosseguir.

A colega de laboratório, Karoline Brito, pela ajuda durante as simulações no Aspen.

Ao professor Romildo Brito, pelo convite em fazer parte do Grupo LARCA.

Aos professores Antônio Brandão, Fernando Fernandes e Romildo Brito, membros da banca examinadora, que contribuirão bastante para o aperfeiçoamento desse trabalho.

A Braskem, pela oportunidade e interesse no desenvolvimento desse trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro dado.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para realização do mesmo.

*"O sucesso é ir de fracasso em fracasso
sem perder o entusiasmo."
(Sir Winston Churchill)*

RESUMO

A influência de impurezas é frequentemente mencionada como uma das causas de acidentes na indústria química. Em todo o mundo, indústrias químicas e petroquímicas, têm se envolvido em acidentes cujos reflexos econômicos, humanos e ambientais muitas vezes ultrapassam os limites de suas instalações. Na indústria de produção de Cl_2 (cloro) devido à presença de amônia (NH_3) no sal, dá origem a Tricloramina (NCl_3), que é um composto extremamente instável e explosivo em determinadas condições de pressão e temperatura. O controle automático da composição de NCl_3 é a forma que permite a operação do processo de forma segura. A modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda as maneiras de representação de sistemas reais, onde o modelo é uma aproximação de apenas algumas características. Com isso o presente trabalho tem por objetivo, fazer uma Identificação do Sistema de produção de cloro, além de propor uma estratégia de controle, desenvolvida no Simulink/Matlab, para as variáveis do processo que necessitam de controle. Sendo assim, essa Dissertação de Mestrado contempla a Identificação do Sistema do modelo da planta de Compressão de Cloro da *Braskem* em Maceió, onde este sistema foi simulado por Brito (2009) em ambiente *Aspen Plus e Dynamics*, e fornecido para o desenvolvimento desse trabalho. Houve a necessidade da adição de controladores em certas variáveis do processo, em decorrência da necessidade de mantê-las operando em determinados valores de referência estabelecidos, para um funcionamento mais seguro da planta. Sinais de excitação do tipo Degrau e PRBS (sinais binários pseudo-randômicos) foram aplicados na vazão de Cloro gás provindo das células eletrolíticas, assim como na vazão de Cloro líquido que entrava no pré resfriador, além da Carga térmica do Refervedor. Os testes em malha aberta foram realizados com o intuito de entender e tirar conclusões sobre o comportamento transiente das variáveis em estudo. Os modelos Função de Transferência, ARX (autoregressivo com entradas exógenas) e Espaço de Estados, foram identificados como os que melhor representariam o comportamento transiente do sistema em estudo. Já a malha de controle proposta ao final desse estudo, traz uma justificativa na implementação de controle a determinada variável em estudo.

Palavras-Chave: Identificação de sistema; Tricloroamina; Degradação; Controle; Dinâmica.

ABSTRACT

The influence of impurities is often mentioned as a cause of accidents in chemical industry. Worldwide oil and chemical industries have been involved in an accident whose consequences economic, environmental and human often exceed the limits of its facilities. In the production industry Cl_2 (chlorine) due to the presence of ammonia (NH_3) in salt, giving rise to trichloramine (NCl_3), a compound that is extremely unstable and explosive under certain conditions of pressure and temperature. The automatic control of the composition of NCl_3 is the form that allows operation of the process safely. In this context, we approached the process of producing chlorine by electrolysis of brine. The stage held until then to present the seminar, included an identification system by obtaining mathematical models. Mathematical modeling is the area of knowledge that studies the ways of representation the real systems, where the model is only an approximation of some characteristics of the real system. Thus this work aims to make a System Identification chlorine production, and propose a control strategy, developed in Simulink / Matlab to process variables that need to control. Therefore, this Dissertation deals with the identification system of the plant model Chlorine Compression of Braskem in Maceió, where this system was simulated by Brito (2009) in *Aspen Plus* and *Dynamics* environment, and provided for the development of this work. The necessity of adding controllers in certain process variables, due to the need to keep them operating at certain benchmarks established for the better functioning of the plant. Excitation signals of type Step and PRBS (pseudo-random binary signal) were applied at a flow rate of chlorine gas coming from the electrolytic cells as well as the flow of liquid chlorine that entered the pre cooler, and the thermal load of the reboiler. The open loop tests were performed in order to understand and draw conclusions about the transient behavior of the variables under study. The Transfer Function models, ARX (autoregressive with exogenous inputs) and state space, were identified as those that best represent the transient behavior of the system under study. Since the proposed control loop at the end of this study, includes a justification to implement a particular control variable under study.

Key-Words: System Identification; Tricloroamina, Degradation; Control; Dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de Compressão do Cloro.....	5
Figura 2 - Temperatura de Descarga do 1º Estágio do Compressor de Cloro.....	6
Figura 3 - Temperatura de Descarga do 2º Estágio do Compressor de Cloro.....	7
Figura 4 - Planta de Produção de Cloro.....	12
Figura 5 - Comportamento da temperatura do Refervedor de Clorofórmio.....	13
Figura 6 - Estrutura de modelo ARX.....	20
Figura 7 - Fluxograma global do processo de produção de cloro.....	25
Figura 8 - Influência do Cloro Gás na temperatura do refervedor.....	26
Figura 9 - Influência do Cloro Gás nas massas no interior do refervedor.....	27
Figura 10 - Influência do Cloro Gás nos níveis do Refervedor e Inter-resfriador.....	28
Figura 11 - Influência do Cloro Gás nas respostas das temperaturas do 1º e 2º estágio do Compressor.....	29
Figura 12 - Influência do Cloro Gás no nível d 8º estágio do Pré-Resfriador.....	29
Figura 13 - Influência do Cloro Gás nas pressões de Refervedor e Inter-Resfriador.	30
Figura 14 - Influência da Carga térmica na temperatura do Refervedor.....	31
Figura 15 - Influência da Carga térmica nas massas no interior do refervedor	32
Figura 16 - Influência da Carga térmica no nível do Refervedor e do Inter-Resfriador.....	33
Figura 17 - Influência da Carga térmica nas respostas das temperaturas do 1º e 2º estágio do compressor.....	34
Figura 18 - Influência da Carga térmica no nível do 8º estágio do Pré-Resfriador.....	35
Figura 19 - Influência da Carga térmica nas pressões do Refervedor e Inter-Resfriador.....	36
Figura 20 - Influência do Cloro Líquido na temperatura do Refervedor	37
Figura 21 - Influência do Cloro Líquido nas massas no interior do refervedor.....	38
Figura 22 - Influência do Cloro Líquido no nível do refervedor e do Inter-Resfriador.....	39
Figura 23 - Influência do Cloro Líquido nas respostas das temperaturas do 1º e 2º estágio do compressor.....	40
Figura 24 - Influência do Cloro Líquido nas pressões do Refervedor e do Inter-Resfriador.....	41
Figura 25 - Influência do Cloro Líquido no nível do 8º estágio do Pré-Resfriador.....	41

Figura 26 - Tela do Ident.....	42
Figura 27 - Configuração dos dados de entrada.....	43
Figura 28 - Amostras importadas para o Ident.....	43
Figura 29 - Seleção das Amostras para Identificação e para Validação.....	44
Figura 30 - Configuração dos parâmetros através dos modelos: Espaço de estados, ARX e FT.....	45
Figura 31 - Ident processo de validação.....	46
Figura 32 - Processo de escolha do modelo no Ident.....	47
Figura 33 - Comportamento da Temperatura do Refervedor à perturbações tipo Degrau a um desvio de +10% e -10%, respectivamente na Vazão do Cloro Gás.....	48
Figura 34 - Dados de Entrada (Vazão de Cloro Gás)-Saída (Temperatura do Refervedor) do Processo, correspondentes às mudanças no set point da vazão de alimentação provocadas pelo elemento PRBS.....	49
Figura 35 - Modelos matemáticos obtidos pela ferramenta Ident para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Vazão de Cloro Gás.....	49
Figura 36 - Resposta de todos os modelos seleccionados para temperatura do Refervedor à uma perturbação na Vazão de cloro Gás.....	50
Figura 37 - Resposta ao modelo escolhido correspondente a temperatura do Refervedor à uma perturbação na Vazão de cloro Gás.....	50
Figura 38 - Dados de Entrada (Carga térmica do Refervedor) – Saída (Temperatura do Refervedor) do Processo, correspondentes às mudanças no set point da vazão de alimentação provocadas pelo elemento PRBS.....	52
Figura 39 - Modelos matemáticos obtidos pela ferramenta Ident para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor.....	53
Figura 40 - Resposta de todos os modelos seleccionados correspondentes a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor.....	53
Figura 41 - Resposta ao modelo escolhido para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor.....	54
Figura 42 - Dados de Entrada (Vazão de Cloro líquido total) – Saída (Temperatura do Refervedor) do Processo, correspondentes às mudanças no set point da vazão de alimentação provocadas pelo elemento PRBS.....	55

Figura 43 - Modelos matemáticos obtidos pela ferramenta Ident para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor.....	56
Figura 44 - Resposta de todos os modelos selecionados correspondentes a temperatura do Refervedor sob uma perturbação na Carga térmica do Refervedor.....	56
Figura 45 - Resposta ao modelo escolhido para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor.....	57
Figura 46 - Sistema de Controle em malha-fechada.....	59
Figura 47 - Efeito do controle proporcional após uma perturbação.....	61
Figura 48 - Malha de controle no Simulink/Matlab.....	63
Figura 49 - Resposta do controle ao Projeto inicial.....	64
Figura 50 - Comportamento da Vazão de Cloro Líquido (a), Temperatura do Refervedor (b) e Temperatura do 1º estágio (c).....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados para os dois Estágios de Compressão.....	6
Tabela 2 – Propriedades Físicas e Químicas do Clorofórmio.....	10
Tabela 3 – Relação das Variáveis de Entrada e Saída do Processo.....	23
Tabela 4 - Especificações do PRBS (<i>Vazão de Cloro Gás vindo das células eletrolíticas para o Pré Resfriador</i>).....	25
Tabela 5 - Especificações do PRBS (<i>Carga térmica do Refervedor de Clorofórmio</i>).....	30
Tabela 6 - Especificações do PRBS (<i>Vazão de Cloro Líquido Total para o Pré Resfriador</i>).....	36
Tabela 7 – Representações matemáticas correspondentes as Variáveis do Processo (<i>Vazão de Cloro Gás vindo das células eletrolíticas para o Pré Resfriador</i>).....	51
Tabela 8 – Representações matemáticas correspondentes as Variáveis do Processo (<i>Carga térmica do Refervedor de Clorofórmio</i>).....	54
Tabela 9 – Representações matemáticas correspondentes as Variáveis do Processo (<i>Vazão de Cloro Líquido Total para o Pré Resfriador</i>).....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

B11, B21 – Splitter

B12, B25 – Mixer

Bi (i = 1:26) – Válvulas

BOTTOM – Corrente da base do inter resfriador

CL2-GAS – Corrente global de cloro gás que entra no pré resfriador

CL2-LIQ – Corrente global de cloro líquido

INTER – Inter resfriador

MAKE-UP – Corrente de reposição de clorofórmio para o refervedor

PRE – Pré resfriador

POS – Pós resfriador

REACTOR – Reator

RECYCLE – Cloro gás que sai do pós resfriador e segue para o pré resfriador

TO-COMP1 – Corrente do topo do pré resfriador que segue para o primeiro estágio de compressão

TO-COMP2 - Corrente do topo do inter resfriador que segue para o segundo estágio de compressão

TO-INT-G – Corrente de cloro gás que sai do primeiro estágio de compressão e segue para o inter resfriador

TO-INT-L – Corrente de cloro líquido que segue para o inter resfriador

TO-LIQUE – Cloro gás que sai do pós resfriador e segue para o sistema de liquefação

TO-POS – Corrente de cloro gás que sai do 2º estágio de compressão e segue para o pós resfriador

TO-PRE – Corrente de cloro líquido que segue para o pré resfriador

TO-REAC – Corrente da base do pré resfriador que segue para o refervedor

WASTE – Corrente de eliminação de clorofórmio do refervedor

1-STAGE – Primeiro estágio do compressor

2-STAGE – Segundo estágio do compressor

SUMÁRIO

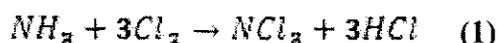
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 IMPUREZAS RESPONSÁVEIS PELAS CAUSAS DE ACIDENTE.....	4
2.2 O SISTEMA DE COMPRESSÃO.....	5
2.3 CLOROFÓRMIO.....	9
2.4 TRICLORAMINA.....	10
2.5 ESTUDOS RELACIONADOS À DEGRADAÇÃO DA TRICLORAMINA.....	10
CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	12
3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CLORO.....	12
3.2 O PROBLEMA.....	13
3.3 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO.....	14
CAPÍTULO 4 – MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS.....	15
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	15
4.1.1 Tipos de modelos.....	16
4.1.2 Representações Lineares (Função de Transferência).....	18
4.1.3 Representação Discreta Geral (ARX).....	19
4.1.4 Espaço de Estados.....	20
4.2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS.....	21
4.2.1 Identificação do modelo da planta.....	22
4.2.1.1 Testes dinâmicos e coleta de dados.....	22
a) <i>Teste na Vazão de Cloro Gás vindo das células eletrolíticas para o Pré Resfriador.....</i>	<i>24</i>
b) <i>Teste na Carga térmica do Refervedor de Clorofórmio.....</i>	<i>30</i>
c) <i>Teste na Vazão de Cloro Líquido Total para o Pré Resfriador.....</i>	<i>36</i>
4.2.1.2 Determinação da estrutura do modelo e estimação de parâmetros.....	42
4.2.1.3 Validação.....	46

a) <i>Vazão de Cloro gás vindo das células eletrolíticas para o Pré Resfriador</i>	47
b) <i>Carga térmica do Refervedor de Clorofórmio</i>	52
c) <i>Vazão de Cloro Líquido total para o Pré-resfriador</i>	55
CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRUTURA DE CONTROLE	59
5.1 CONTROLE DE PROCESSOS.....	59
5.2 IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES PID.....	61
5.3 ADIÇÃO DO CONTROLADOR SPLIT RANGE.....	63
5.4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE NO SIMULINK/MATLAB.....	65
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO	67
CAPÍTULO 7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXO	72

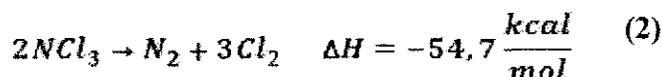
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A influência de impurezas é freqüentemente mencionada como uma das causas de acidentes na indústria química. Embora pouco se tenha estudado sobre essa influência em reações existentes no processo industrial, sabe-se que isso afeta a segurança e estabilidade do processo. A contaminação com traços de impurezas pode ocasionar acidentes graves. (GUSTIN, 2002)

A produção de Cloro (Cl_2) eletrolítico a partir de solução aquosa de cloreto de sódio ou de cloreto de potássio (KCl) devido à presença de amônia (NH_3) no sal, dá origem a Tricloramina (NCl_3), que é um composto extremamente instável e explosivo em determinadas condições de pressão e temperatura, mesmo se apresentando em concentrações baixas, estará presente no Cl_2 produzido, segundo a equação 1:



A Tricloramina (NCl_3) formada na reação química de produção do Cl_2 é degradada na presença de Clorofórmio ($CHCl_3$), de acordo com a equação 2, onde este funciona apenas como um solvente inerte. Sendo a NCl_3 um composto extremamente instável e explosivo em determinadas condições. Medidas preventivas são necessárias ser tomadas, com a finalidade de tornar o processo seguro.



O controle automático que proporciona a quantidade de NCl_3 atuar abaixo do valor determinado como limite de máximo de operação, é a forma que permite a operação do processo de forma segura. Para isso, sistemas de controle são projetados a fim de manter o controle de variáveis que conseqüentemente conduzem a degradação de NCl_3 .

Para implementação de um sistema de controle, é necessário antes, um breve conhecimento sobre o processo em estudo. Isso se dá através de uma Identificação do sistema, obtido através de uma modelagem matemática. O modelo desenvolvido para um sistema é apenas em representação aproximada, ou seja, o modelo é uma aproximação de apenas algumas características do sistema real (AGUIRRE, 2007).

Ser capaz de elaborar um modelo matemático para um sistema permite estudar vários problemas, como por exemplo, a detecção de falhas, controle de processos, análise de comportamento complexo. (ROCHA, 2006).

Esse trabalho de dissertação corresponde a um estudo da Unidade de Cloro Soda da *Braskem* em Maceió. Tavares (2006) estudou esse processo, considerando fluxogramas contendo apenas Refervedor e Pré-Resfriador interligados, além de usar como solvente o Tetra cloreto de Carbono. Já Brito (2009) realizou a simulação do processo acrescentando ao estudo, o sistema de compressão, onde este foi acoplado ao refervedor/pré resfriador. Verificando assim a influência deste sistema de compressão na degradação da Tricloroamina. No estudo da dissertação apresentada a seguir, tomou-se como base o sistema proposto por Brito (2009), onde ao mesmo houve a necessidade da adição de controladores para obter um funcionamento mais confiável da planta de operação, evitando assim, que em alguns equipamentos o nível baixasse muito, atingindo seu esvaziamento, ou transbordasse. Os dados em comportamento transiente foram obtidos por simulação utilizando o software *Aspen Dynamics*. Em seguida foi realizada a Identificação do sistema, obtida por Modelagem matemática, utilizando o Ident/Matlab. E por fim, o Sistema de Controle proposto no trabalho justifica um dos problemas existentes na planta de produção de Cloro na Unidade Braskem – Maceió, que é a influência do controle da Temperatura do 1º estágio do Compressor sobre a Temperatura do Refervedor, utilizando-se do Simulink/Matlab.

Esse estudo representa uma contribuição bastante significativa para Indústria Cloro/Soda da *Braskem*, além de realizar uma identificação do modelo da planta, o trabalho propõe um sistema de controle, que justifica a não necessidade de controle da Temperatura do 1º estágio do Compressor, como hoje é utilizado na Empresa Braskem. O sistema de controle apresentado no presente trabalho corresponde a apenas uma parte da malha total que compõe a estratégia de controle do projeto.

O trabalho de dissertação está dividido da seguinte forma:

O capítulo, REVISÃO DO ESTADO DA ARTE, apresenta uma revisão da literatura contendo informações necessárias e importantes ao saber, para o entendimento do estudo em questão.

O capítulo, DESCRIÇÃO DO PROBLEMA, descreve o problema em estudo na presente dissertação. Além disso, apresenta quais os objetivos a serem alcançados.

O capítulo, MODELAGEM MATEMÁTICA, realiza os testes na malha fechada da planta, assim como, a identificação do sistema em estudo, utilizando a ferramenta Ident do software MATLAB.

O capítulo SISTEMA DE CONTROLE apresenta uma malha de controle do sistema, que tem como principal objetivo justificar o comportamento da Temperatura do Refervedor, ao tentar controlar a Temperatura do 1º estágio do Compressor.

O capítulo, CONCLUSÕES, contém as informações obtidas durante a realização do trabalho, assim como as interpretações referidas às mesmas.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

O capítulo a seguir, tem em sua composição, uma revisão bibliográfica sobre diversos pontos de interesse no trabalho em estudo. Sendo eles: Impurezas responsáveis pela causa de acidentes; O Sistema de Compressão; Clorofórmio; e Estudos relacionados à degradação da Tricloramina.

2.1 Impurezas responsáveis pela causa de acidentes

A influência de impurezas é frequentemente mencionada com uma das causas de acidentes na indústria química. Em condições de processo (temperatura, pressão e composição) onde existe potencial para reação de decomposição rápida e exotérmica, a contaminação com traços de impurezas pode ocasionar acidentes graves. (GUSTIN, 2002)

A produção de Cl₂ eletrolítico a partir de solução aquosa de cloreto de sódio ou de cloreto de potássio (KCl), devido à presença de amônia (NH₃) no sal, produz a NCl₃, que é um composto extremamente instável e explosivo em determinadas condições de pressão e temperatura, mesmo em se tratando de concentrações baixas, estará presente no Cl₂ produzido, em função da reação química abaixo, correspondente a equação 3:



Registros de explosões em plantas de Cl₂ devido a altas concentrações de NCl₃ são relatados por VOGLER (1963), DOKTER (1985), GUSTIN (2005) e GERRAT (2002).

A NCl₃ formada dentro da célula eletrolítica segue com a corrente de Cl₂ gasoso, tornando-se uma impureza perigosa do Cl₂ líquido, visto que a evaporação posterior do Cl₂ líquido em vasos fechados irá concentrar a NCl₃. De acordo com o relatório GEST 76/55 (2001), 1 ppm de NH₃ na salmoura a ser eletrolisada é suficiente para resultar em mais de 50 ppm de NCl₃ no Cl₂ líquido. Composições em massa superiores a 1000 ppm de NCl₃ geram graves riscos de acidente na planta. Desta forma, a eliminação da NH₃ antes da eletrólise se faz necessária e, normalmente, é realizada através da injeção de uma corrente de Cl₂ gasoso na corrente de salmoura enviada para as células eletrolíticas, o que

proporciona a formação da monocloramina (NH_2Cl), em composto volátil que se desprende do meio líquido com facilidade.

2.2 O Sistema de Compressão

O fluxograma global do processo de produção de cloro conforme se encontra instalado na Unidade Industrial de Cloro/Soda da *Braskem* situada em Maceió, pode ser visto através da Figura 1, maiores informações sobre o funcionamento desse fluxograma podem ser encontradas em Tavares (2006) e Brito (2009). A área em destaque corresponde a Área de Compressão, a que se refere o estudo desse trabalho.

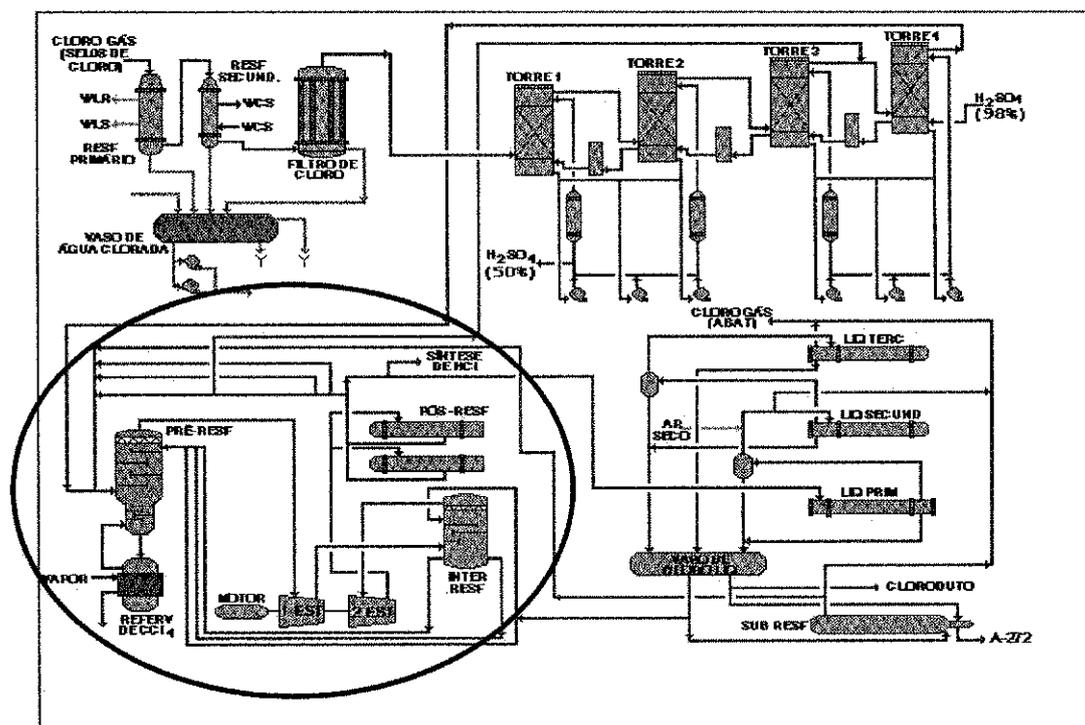


Figura 1 - Sistema de Processamento do Cloro. (Memorial descritivo da Braskem – Maceió/AL)

Teoricamente, o gás cloro que deixa o sistema de secagem pode ser liquefeito diretamente. Porém a temperatura extremamente baixa e o alto custo operacional requerido tornam na prática, proibitiva a sua liquefação neste ponto do processo. Comprimindo o gás, a liquefação é permitida em temperaturas mais elevadas e dentro de limites econômicos razoáveis. Na *Braskem* a área de compressão foi projetada para liquefazer o gás cloro

comprimido, aproximadamente 10 kgf/cm², por um compressor centrífugo e de dois estágios.

Dois estágios de compressão são requeridos, a fim de se evitar altas temperaturas. A fim de atender as exigências da temperatura de entrada do gás no primeiro estágio, existe o pré resfriador e, para o segundo estágio existe o inter resfriador. Existe ainda o pós resfriador, cuja finalidade é a de resfriar o gás que sai do segundo estágio do compressor.

Os equipamentos necessários para a compressão do gás cloro são: compressor de cloro, pré resfriador, refervedor de CHCl₃, inter resfriador e Pós-resfriador de cloro.

Compressor de Cloro

As especificações para os dois estágios de Compressão estão apresentadas na Tabela 1, abaixo:

Tabela 2 - Dados para os dois Estágios de Compressão.

	kgf/cm ² (ENT)	kgf/cm ² (SAI)	°C
1º ESTÁGIO	0,89	3,7	103
2º ESTÁGIO	3,7	10	112

Este tipo de compressor comprime o gás acelerando-o a uma alta velocidade com um conjunto rotativo e então fazendo com que sua velocidade decresça em uma parte não rotativa, ocorrendo então o aumento da pressão do gás. O comportamento das temperaturas do 1º e 2º estágio do compressor é mostrado nas Figuras 2 e 3 a seguir.

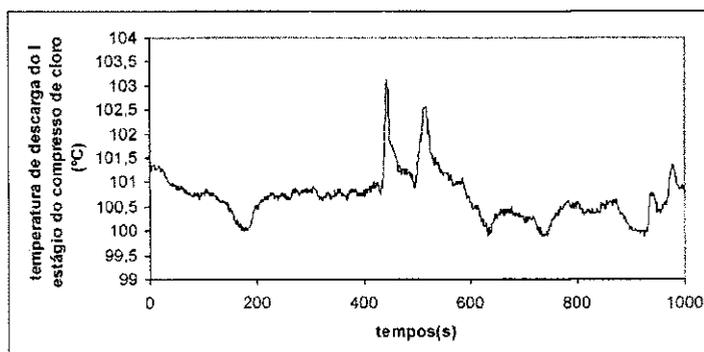


Figura 2 – Temperatura de Descarga do 1º Estágio do Compressor de Cloro.

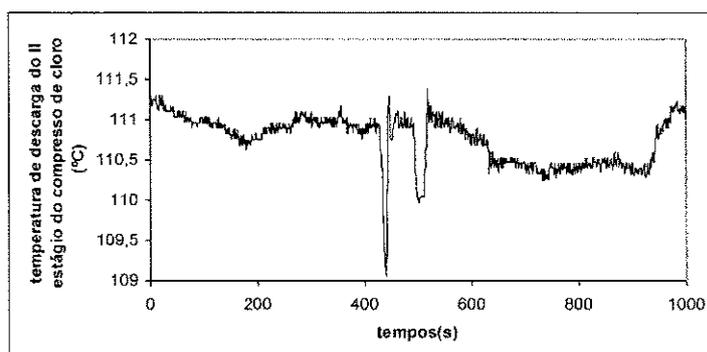


Figura 3 – Temperatura de Descarga do 2º Estágio do Compressor de Cloro.

É necessária que a temperatura de descarga do primeiro e segundo estágio do compressor de cloro se mantenha nessa faixa correspondente a mostrada na Tabela 1, com o objetivo de evitar a possibilidade de arraste de líquido para o interior do compressor e/ou sobre corrente no motor elétrico.

Pré Resfriador

Os gases que saem do filtro de cloro gás seco, antes de entrarem no primeiro estágio do compressor, recebem parcelas de gás cloro de vários pontos do processo. Após esta mistura, está em torno de 30°C, o que ainda não é a exigida pelas especificações do compressor para a entrada no primeiro estágio (-34°C).

Os gases a serem resfriados entram pela parte inferior da torre principal do pré resfriador, borbulhando em cloro líquido existente nas cinco bandejas, onde é resfriado. No presente caso, é usado o calor latente de vaporização do líquido refrigerante, ou seja, aquela quantidade de calor necessária para mudança de fase líquido-gás, sem variação na temperatura. O cloro líquido usado como refrigerante entra pela parte superior da torre fluindo por gravidade para o fundo da torre, este cloro líquido ao sofrer bruscamente uma queda de pressão (para 0,89 kgf/cm²) causa o abaixamento da temperatura até a sua temperatura de condensação à pressão ambiente, no caso -36°C.

Refervedor de Clorofórmio

É o refervedor quem propicia a circulação de CHCl₃ na parte inferior do pré resfriador através da vaporização do CHCl₃ provocada por aquecimento externo (camisa de

vapor), recebendo posteriormente impurezas que são arrastadas pela injeção de cloro em excesso que condensa o CHCl_3 , solubilizando a Tricloramina que será decomposta por aquecimento. Uma das impurezas mais importantes eliminada por este sistema é a Tricloramina (NCl_3), onde esta é capaz de decompor-se quimicamente gerando considerável volume de gases a altas temperaturas, dependendo da ação de um agente utilizado como solvente. O CHCl_3 é um estabilizador da NCl_3 e quando mantido em temperaturas ao redor de 50°C , provoca uma decomposição controlada da NCl_3 em nitrogênio e cloro. Temperaturas superiores a 70°C devem ser evitadas, correndo-se o risco de explosão; pois acima deste limite a ação estabilizadora do CHCl_3 já se torna fraca. Temperaturas no refeedor inferiores a 40°C também devem ser evitadas, pois pouco CHCl_3 circularia no pré resfriador, deixando passar quantidades de NCl_3 , impurificando o cloro líquido (GERRAT, 2002). Além disso, em temperaturas inferiores a 40°C a decomposição da NCl_3 é lenta, o que pode motivar altas concentrações de NCl_3 no CHCl_3 , ocorrendo também possibilidade de explosão.

O nível de CHCl_3 pode tanto crescer como diminuir. Mesmo operando dentro dos limites do projeto, uma pequena quantidade de CHCl_3 é arrastada pelo gás cloro, que deixa o pré resfriador, o que provoca um abaixamento do nível no refeedor. Por outro lado, as impurezas absorvidas pelo CHCl_3 , fazem o seu volume aumentar. Vapor é a fonte de calor utilizada para evaporar CHCl_3 no refeedor, essa injeção é feita em uma camisa que envolve externamente o refeedor.

Inter Resfriador

Os gases que deixam o primeiro estágio do compressor a $3,7 \text{ kgf/cm}^2$ e ($\sim 103^\circ\text{C}$) precisam ser resfriados até sua temperatura de condensação ($-4,2^\circ\text{C}$) antes de entrarem no segundo estágio. Esse resfriamento é feito no resfriador intermediário do compressor de cloro, usando como refrigerante o calor latente de vaporização do cloro líquido, tal qual é usado no pré resfriador.

O cloro líquido usado como refrigerante entra pela parte superior da torre, este cloro líquido ao sofrer bruscamente uma queda de pressão (para $3,7 \text{ kgf/cm}^2$) provoca o abaixamento da temperatura. O gás cloro a ser resfriado entra pela parte inferior da torre, borbulhando em cloro líquido existentes nas duas bandejas. O cloro líquido evaporado mais

o cloro resfriado ($-4,2^{\circ}\text{C}$) saem pela parte superior, após passarem por um eliminador de névoa, cuja finalidade é evitar que partículas de cloro líquido sejam arrastadas para dentro do compressor, pois isso causaria corrosão nos rotores.

Pós Resfriador

Os gases que saem do segundo estágio do compressor têm uma temperatura muito elevada ($\sim 110^{\circ}\text{C}$), tanto para serem usados no reciclo dos gases como para a liquefação de cloro. É necessário, portanto que sofram um resfriamento, este resfriamento é feito no resfriador final de cloro, usando água da torre de resfriamento, como líquido refrigerante. Após o pós resfriador parte do gás segue para o reciclo dos gases e a outra parte segue para a liquefação do cloro.

Reciclo dos Gases

A finalidade é a de proporcionar um volume sempre constante na sucção do compressor, mantendo, além disso, uma pressão negativa (vácuo) fixa do lado da aspiração. Isto é possível, fazendo-se com que parte do gás já comprimido, volte para a sucção do compressor, através de um automatismo, que controla esse volume.

2.3 Clorofórmio

Em plantas Cloro-Soda, na maioria das vezes, os processos utilizam na purificação do cloro solventes inertes, onde os três mais recomendados são: Cl_2 , CHCl_3 e CCl_4 .

O Clorofórmio (CHCl_3) é o solvente substituto do Tetra cloreto de Carbono (CCl_4) cujo, teve sua venda proibida nos países desenvolvidos desde 1996, e pelos países subdesenvolvidos nesse ano de 2010. O CHCl_3 já é empregado em muitas plantas de Cloro/Soda no mundo.

O CHCl_3 é um pouco corrosivo, sendo assim recomenda-se que pelo menos uma vez por ano, seja realizada inspeção deste equipamento e instalado refervedor reserva.

A seguinte Tabela 2 apresenta algumas propriedades fisico-químicas do CHCl_3 .

Tabela 2 – Propriedades Físicas e Químicas do Clorofórmio

Propriedades	Valores
Ponto de Ebulição (°C) a 101.3 kPa	61.3
Pressão de Vapor (kPa) a 20°C	21.3
Densidade (g/cm ³) a 25 °C	1.48
Solubilidade na Água (g/litro) a 25 °C	7.2 – 9.3

Valores de Tricloramina são estimados segundo (Environment Canada & Health Canada, 2001)

A NCl_3 é ligeiramente menos volátil do que CHCl_3 , visto que o ponto de Ebulição da NCl_3 é $\sim 69^\circ\text{C}$. Isto significa que uma maior quantidade de Clorofórmio poderá ser reportada.

2.4 A Tricloramina (NCl_3)

A oxidação de compostos orgânicos contendo nitrogênio em sua fórmula (aminas, amidas, cianetos, uréia), utilizando cloro, fornece cloroaminas instáveis. Entre as cloroaminas, destaca-se a NCl_3 que é um composto extremamente instável e é uma das principais impurezas existentes no processo de produção de cloro. A NCl_3 é apenas ligeiramente solúvel em água e pode ser obtida por cloração de soluções aquosas contendo íons amônio, nitrato de amônio, sulfato de amônio, cloreto de amônio ou amoníaco.

Na decomposição da NCl_3 , 1 mol de nitrogênio e 3 moles de cloro são produzidos por 2 mol de NCl_3 . O solvente não participa desta decomposição (GUSTIN, 2005). A NCl_3 é solúvel em Cl_2 , CCl_4 e CHCl_3 . Outros solventes às vezes também são mencionados como o benzeno ou o dissulfeto de carbono, mas deve ser evitado o uso de solventes que possam ser reagidos por NCl_3 ou cloro, pois a solução obtida pode ser instável e violenta. (GUSTIN, 2005). No processo de produção do Cl_2 , devido a presença da amônia, há a formação da NCl_3 , que é um composto extremamente instável e de caráter explosivo, como citado anteriormente. A NCl_3 formada provoca explosões muito facilmente durante aquecimentos rápidos, mesmo em quantidade de uma grama. Esta detonação pode ser evitada com a adição de compostos alcalinos ou agitação intensa (GUSTIN, 2005). A NCl_3 é líquida em condições normais de temperatura e pressão. O ponto de ebulição teórico é de $71,8^\circ\text{C}$. A densidade do líquido é de $1,635 \text{ g/cm}^3$ à temperatura ambiente, e por este motivo, o líquido pode se acumular abaixo da água sem ser detectado. A pressão de vapor do líquido puro é de 150 mmHg à 20°C e 80 mmHg à 0°C (GUSTIN, 2005).

2.5 Estudos relacionados à degradação da Tricloramina

O sistema de degradação da NCl_3 foi produto de estudo de diversos autores, dentre eles pode-se citar BRITO(2009), TAVARES (2006) e LENP (2004).

O sistema usado para decomposição, produzido por Tavares (2006), foi constituído por um pré resfriador e um refeedor acoplados, cujo problema principal era a manutenção da temperatura do refeedor dentro de uma faixa segura. Além disso, Tavares propôs uma nova configuração de controle, que aplicado na planta industrial resultou em forte redução da variabilidade da temperatura do refeedor. Em seu trabalho ele concluiu que a causa principal da oscilação da temperatura no refeedor era a manipulação da vazão de cloro líquido que entra no pré resfriador. A temperatura do refeedor era fortemente dependente das vazões de cloro líquido e de cloro gás. Ele utilizou o Tetracloreto de carbono como solvente em seu estudo.

O estudo de Brito (2009) utilizou o sistema contendo o pré resfriador e o refeedor, assim como o utilizado no trabalho de Tavares, incluindo a este um sistema de compressão. Visto que teoricamente o gás cloro que deixa o sistema de secagem pode ser liquefeito diretamente, porém a temperatura extremamente baixa e o alto custo operacional requerido tornam na prática, proibitiva a sua liquefação neste ponto do processo. Comprimindo o gás, a liquefação é permitida em temperaturas mais elevadas e dentro de limites econômicos razoáveis. Com relação às temperaturas de descarga nos estágios do compressor foi verificado que a maior parte dos distúrbios não provocava nenhuma mudança significativa. O solvente utilizado nesse estudo foi o Clorofórmio. O LENP estudou a substituição do CCl_4 por CHCl_3 na unidade de degradação de NCl_3 do processo de produção de Cloro da Unidade de Cloro Soda de Alagoas da *Braskem*, através do desenvolvimento e implementação do modelo matemático, validado com dados da planta operando com CCl_4 . Concluindo que mantendo a pressão do refeedor igual à pressão usada com sistema contendo CCl_4 , a perda de CHCl_3 foi o dobro da perda de CCl_4 . Reduzindo-se a vazão de refluxo (cloro líquido) a vazão de recirculação do pré resfriador diminui drasticamente: a perda de CHCl_3 foi igual à perda de CCl_4 .

CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo, o processo de produção do cloro e sua operação são descritos, assim como, o problema em estudo é apresentado e os objetivos aos quais se planeja atingir.

3.1 Descrição do processo de produção de Cloro

O processo de produção de cloro usado na BRASKEM S.A. (A Unidade de Cloro-Soda em Maceió-AL), é a transformação do cloreto de sódio ou potássio provindo da salmoura que é sujeita à ação de corrente elétrica, que gera a eletrólise no NaCl, formando cloro (Cl_2), hidróxido de sódio (NaOH) e hidrogênio (H_2). Onde o principal resultado é a formação do gás cloro, que corresponde à grande maior parte (96%) do total dos gases que deixam o compartimento anódico das células. A Figura 4 apresenta o fluxograma da planta, contendo as principais etapas de produção do cloro.

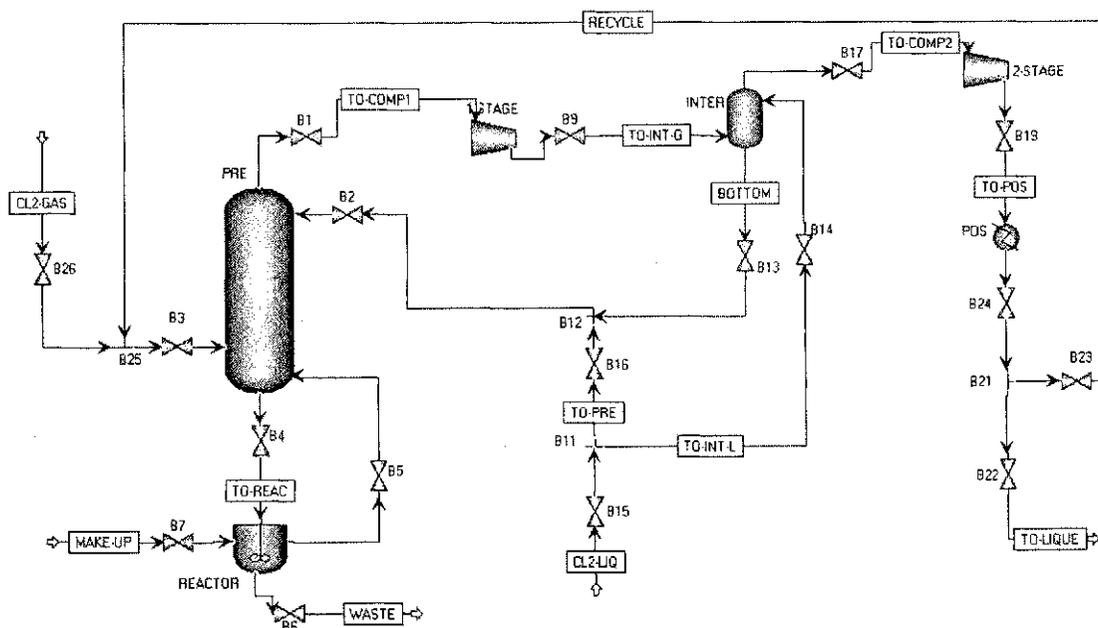


Figura 4 – Planta de Produção de Cloro

Brito (2009) simulou o sistema de compressão de cloro da *Braskem*, contendo acoplados ao sistema um reator, um sistema de compressão e uma coluna de absorção

utilizando o Clorofórmio (CHCl_3) como solvente, além de um Inter e um Pós-resfriador de cloro. O processo final de produção de cloro visa à obtenção do cloro gás comprimido. Uma etapa posterior a de compressão, que não diz respeito a esse estudo do trabalho, terá como objetivo liquefazer esse cloro. Onde então, esse produto estará pronto para distribuição e comercialização. De acordo com a operação atual da planta, a vazão de cloro líquido para o Pré-resfriador e a vazão de vapor, são variáveis que apresentam forte influência na variabilidade da temperatura do refervedor.

Outro aspecto relevante na operação da planta refere-se à corrente de alimentação do Pré-resfriador de cloro que consiste no somatório da recirculação do compressor de cloro, gás da descarga do sub-resfriador de cloro e a corrente referente à produção da planta. Essa corrente principal tem a característica de permanecer com pouca variabilidade durante a maior parte do processo, razão pela qual não interfere significativamente na temperatura do refervedor.

3.2 O problema

A seguir, na Figura 5, é apresentado o comportamento transiente real da temperatura do refervedor de CHCl_3 em uma situação típica, onde é possível observar a forte interferência do fenômeno na segurança e estabilidade do processo. A degradação da NCl_3 é bastante comprometida devido à grande variabilidade na temperatura do refervedor.

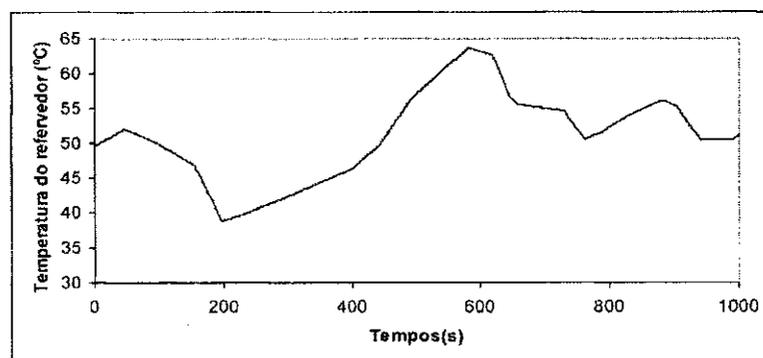


Figura 5 – Comportamento da Temperatura do Refervedor de Clorofórmio.

Este trabalho tem elevada importância, considerando o fato de que o processo não opera de forma satisfatória, necessitando ser controlado com o intuito de evitar problemas

de segurança graves, como por exemplo, o aumento da concentração da Tricloroamina no refeedor. Logo, a estratégia de controle visa:

- Reduzir a perda de Clorofórmio (CHCl_3) por evaporação, devido à elevada variabilidade de temperatura de operação do refeedor de CHCl_3 ;
- Controlar a concentração de NCl_3 , para que a mesma não seja superior a 1000 ppm, evitando assim um risco de explosão no refeedor;
- Assegurar a decomposição da NCl_3 através da manutenção da temperatura do refeedor;

3.3 Objetivos e Motivação

Este trabalho tem como objetivo geral, controlar a variabilidade e a segurança do processo de produção de Cloro na *Braskem*. Para que se possa atingir esse objetivo, é necessário que alguns objetivos específicos sejam realizados:

- Avaliação do comportamento transiente do sistema para as diferentes condições operacionais;
- Realização da Identificação do Sistema da planta industrial de Cloro da Braskem;
- Desenvolvimento e implementação de uma estratégia de controle, utilizada como justificativa para uma situação existente na planta de produção de Cloro da unidade de Cloro-Soda em Alagoas-Maceió.

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM E IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS

Este capítulo apresenta a seguir, uma breve definição sobre Modelagem matemática, os tipos de modelos mais utilizados, os testes dinâmicos aplicados aos dados obtidos da planta, e ainda se conclui, qual o Modelo dinâmico que melhor se adéqua aos propósitos do trabalho.

4.1 Modelagem Matemática

O modelo desenvolvido para um sistema é apenas em representação aproximada, conseqüentemente não existe o modelo do sistema, mas sim uma família de modelos com características e desempenhos variados, ou seja, o modelo é uma aproximação de apenas algumas características do sistema real (AGUIRRE, 2007). A validação de um modelo é determinada pela experimentação.

Ser capaz de elaborar um modelo matemático para um sistema permite estudar vários problemas, como por exemplo, a detecção de falhas, controle de processos, análise de comportamento complexo. (ROCHA, 2006).

A modelagem de processos pode ser realizada de duas formas: a partir das leis fundamentais da física e química (modelagem fenomenológica), e a partir da informação contida nas variáveis de processo, registradas ao longo do tempo (modelagem empírica ou identificação de processos).

Conhecer o modelo que represente o processo é fundamental para a teoria de controle linear e não-linear. Embora em muitas áreas os modelos fenomenológicos (obtidos a partir de balanços de massa, energia e quantidade de movimento) sejam conhecidos, eles apresentam enorme dificuldade em serem encontrados, e por este motivo, demandam de muito tempo e investimento financeiro.

Em contrapartida, surge a identificação de sistemas, que necessita apenas de conhecimentos de entrada e saída para modelar o processo. Portanto, modelos gerados

através da identificação de sistemas tendem a ser mais simples, o que torna vantajoso para a representação de processos complexos (ASSIS, 2001).

A fim de desenvolver modelos aproximados, normalmente fazem-se considerações simplificadoras. Quando o modelo estiver pronto e for testado, se o seu desempenho for considerado inadequado, uma coisa a fazer é reavaliar a pertinência das considerações feitas durante o seu desenvolvimento. Algumas considerações comumente feitas durante a identificação dos modelos são mostradas adiante:

- **Linearidade** → Supõe que o sistema modelado comporta-se de forma linear. Tal suposição é normalmente verificada observando-se o comportamento de um sistema numa faixa relativamente estreita de operação. A consideração de linearidade normalmente simplifica muito o modelo a ser desenvolvido, entretanto, há situações em que esta consideração não é adequada, como para sistemas fortemente bilineares, e no caso em que se deseja estudar características dinâmicas não-lineares do sistema, tais como oscilações e bifurcações.
- **Invariância no tempo** → Isso implica que o comportamento do sistema que está sendo modelado não varia com o tempo, ou seja, as variáveis do sistema têm valores constantes. Portanto ser invariante no tempo, não significa que o sistema está 'estático', mas certamente implica que a dinâmica que está regulando a evolução temporal é a mesma. Formalmente diz-se que um sistema é invariante se um deslocamento no tempo de entrada causa um deslocamento no tempo de saída.
- **Concentração de parâmetros** → Resulta em equações diferenciais ordinárias. Esse tipo de representação pressupõe que as variáveis de interesse variam apenas com o tempo e não com o espaço. Por outro lado, equações diferenciais parciais descrevem o sistema tanto no tempo, quanto no espaço (AGUIRRE, 2007).

4.1.1 Tipos de modelos

Seria impossível descrever todos os tipos de modelos matemáticos. A seguir, mencionam-se alguns dos mais comuns.

Modelos estáticos e dinâmicos. Modelos estáticos relacionam variáveis sem quantificar sua dependência temporal. Se a evolução temporal de um sistema é desejada,

modelos dinâmicos devem ser utilizados. Modelos estáticos são normalmente descritos por equações algébricas, ao passo que modelos dinâmicos são compostos por equações diferenciais, sendo que tais modelos podem também incluir algébricas. Todo sistema real é, em última análise, dinâmico. A opção por descrever um sistema real por um modelo estático é viável quando a sua dinâmica não é relevante. Esse é o caso quando a dinâmica é muito rápida ou muito lenta, se comparada com a escala de tempo de interesse.

Modelos discretos e contínuos. Aqui os termos discreto e contínuo se referem ao tempo. Modelos dinâmicos contínuos são descritos por equações diferenciais e representam a evolução do sistema continuamente no tempo. Em contraste, modelos dinâmicos discretos no tempo representam a evolução do sistema em instantes discretos e são descritos por equações de diferenças.

Modelos autônomos e não autônomos. Um modelo é autônomo se ele não depende explicitamente do tempo. No contexto de modelagem, serão chamados de autônomos os modelos que não contêm de forma explícita sinais de entrada gerais. Um modelo com pelo menos uma entrada geral será denominado não autônomo.

Modelos monovariáveis e multivariáveis. Um modelo com mais de uma entrada ou mais de uma saída é denominado multivariável. Modelos monovariáveis são aqueles que representam a relação causa e efeito de apenas um par de variáveis, ou seja, de uma entrada para uma saída. Na literatura, modelos monovariáveis são conhecidos como modelos SISO (single input, single output). Por outro lado, modelos multivariáveis podem ser classificados dependendo do número de entradas e de saídas. Modelos de múltiplas entradas e uma saída são referidos como modelos MISO (multiple inputs, single output); modelos com uma única entrada e mais de uma saída são denominados modelos SIMO (single input, multiple outputs); e modelos com mais de uma entrada e mais de uma saída são chamados de modelos MIMO (multiple inputs, multiple outputs). Deve ser denotado que o uso de modelos monovariáveis não implica em que o sistema real tenha apenas uma entrada e uma saída. De fato, a maioria dos sistemas reais tem várias entradas e várias saídas, muitas delas possivelmente desconhecidas.

Modelos determinísticos e estocásticos. Modelos determinísticos são aqueles em que as variáveis e parâmetros são tratados como não sendo variáveis aleatórias. Por outro lado, os modelos estocásticos lidam com as diversas fontes de incerteza presente em

qualquer situação real por meio de variáveis aleatórias. Em outras palavras, um modelo estocástico, pode ser interpretado como sendo uma aproximação de alguma função densidade de probabilidade condicional, que relaciona a entrada a uma determinada seqüência de valores históricos, a sua saída como sendo, por exemplo, a esperança matemática de uma variável aleatória. Na prática, isto significa que para um modelo estocástico, ao contrário do que para um modelo determinístico, a saída no instante t não pode ser exatamente determinada a partir de dados referentes ao passado.

Modelos paramétricos e não-paramétricos. A distinção entre estes dois tipos de modelos não é totalmente universal. Na maioria dos casos, serão denominados paramétricos aqueles modelos que tiverem parâmetros, ou seja, números, coeficientes que o caracterizem. Por outro lado, modelos não-paramétricos serão representações gráficas, tais como a resposta ao impulso e a resposta em frequência. (AGUIRRE, 2007)

4.1.2 Representações Lineares (Funções de Transferência)

Uma das representações mais importantes na modelagem de sistemas dinâmicos é a função de transferência. Funções de transferência são funções que modelam o comportamento dinâmico de um par entrada-saída de um sistema. A FT de um sistema é por definição, a transformada de Laplace da sua resposta a um distúrbio aplicado. A FT pode ser obtida dividindo-se a transformada de Laplace da saída pela transformada de Laplace da entrada, tornando assim uma FT representada pela razão de dois polinômios, como pode ser observado na equação 4:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_qs^q}{a_0 + a_1s + \dots + a_ns^n} \quad (4)$$

Os zeros de $G(s)$ são os valores de $s = z_1, z_2, \dots, z_n$, para os quais $G(s)$ se anula. Em outras palavras os zeros de $G(s)$ são os zeros do polinômio $Y(s)$. Semelhantemente, os pólos de $G(s)$, $s = p_1, p_2, \dots, p_p$, são os zeros do polinômio $U(s)$. A ordem de uma função de transferência é igual ao número de pólos, ou seja, igual a n . Para funções de transferência

de sistemas reais, tem-se que: $n \geq q$. Tanto os pólos quanto os zeros de uma FT podem ser reais ou complexos, um par complexo é representado por $\alpha \pm j\beta$. (AGUIRRE, 2007)

Muitos processos industriais podem ser modelados matematicamente por funções de transferência da forma da equação 5:

$$H(s) = \frac{K(s-z)^j e^{-\tau_d s}}{s^i (\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (5)$$

Sendo que τ_1 e τ_2 são constantes de tempo, τ_d é o atraso puro de tempo, i é o número de ‘integradores puros’, $s=z$ é um zero de multiplicidade j .

A vantagem de descrever a dinâmica de um processo dinâmico por meio de FT é que existe um grande número de resultados disponíveis, especialmente na área de projeto e sintonia de controladores. Além disso, é prático, e até mesmo intuitivo, caracterizar a dinâmica de processos em termos dos parâmetros K , τ_1 , τ_d e τ_2 .

4.1.3 Representação Discreta Geral (ARX)

Como já foram abordadas anteriormente, muitas é as possibilidades existentes para se representar um sistema dinâmico através de modelos matemáticos. Dentre estas representações existem algumas que são especialmente adequadas à identificação de sistemas onde se deseja conhecer os parâmetros do processo a ser modelado.

O modelo auto-regressivo com entradas externas (ARX) é representado pela seguinte equação 6:

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)} u(k) + \frac{1}{A(q)} v(k) \quad (6)$$

$$A(q) = a_1 q^{-1} + \dots + a_{ny} q^{-ny}$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{nu} q^{-nu}$$

$A(q)$ e $B(q)$ são os polinômios que contém, respectivamente, os pólos e os zeros do sistema; q é o operador de atraso; nu e ny os maiores atrasos dos polinômios $A(q)$ e $B(q)$.

A escolha desse modelo se deve ao fato da sua FT ser simples, não adiciona novos parâmetros e está unicamente relacionado com os parâmetros da FT dos núcleos.

Abaixo na Figura 6, é apresentada a estrutura do modelo ARX.

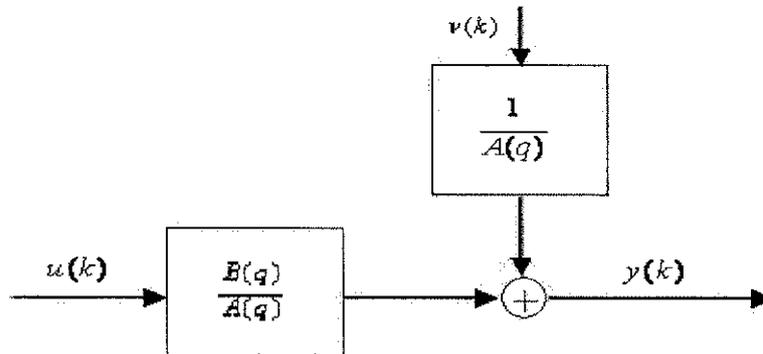


Figura 6 – Estrutura de modelo ARX

Uma vez que o ruído $v(k)$ aparece diretamente na equação, o modelo ARX é normalmente classificado como pertencendo à classe de modelos de *erro na equação*. (AGUIRRE, 2007).

4.1.4 Espaço de Estados

Esse tipo de representação descreve o sistema no domínio do tempo e é mais conveniente para representar sistemas não-lineares e multivariáveis do que a função ou matriz de transferência. Um modelo típico em espaço de estados tem a seguinte forma, equação 7:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (7)$$

Sendo que $x \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estado n-dimensional, o ponto indica a derivada temporal, ou seja, $\dot{x} = dx/dt$; $u(t) \in \mathbb{R}^r$ é o vetor de entradas formado por r funções temporais; $y(t) \in \mathbb{R}^m$ é o vetor m-dimensional de saídas medidas e A, B, C, e D são matrizes constantes. O modelo representado pela equação acima será multivariável se $r > 1$

e/ou $m > 1$. Se houver apenas uma entrada $r=1$ e uma saída $m=1$, o modelo é dito monovariável.

Uma vez que relaciona as variáveis de entrada e saída, é importante a obtenção da função de transferência a partir da representação em espaço de estados. Isso pode ser feito utilizando a transformada de Laplace da saída e entrada do sistema. Devendo-se aplicar a transformada de Laplace ao modelo representado na equação 7.

O modelo de espaço de estados não apenas tem informação sobre a relação entrada-saída, mas também “informação interna” que são as próprias variáveis de estado (AGUIRRE, 2007).

4.2 Identificação de Sistemas Dinâmicos

A identificação de sistemas é uma forma de construir modelos matemáticos através de dados experimentais (ROCHA, 2006). A classificação dos sistemas usados em identificação de sistemas é: sistema caixa preta, sistema caixa cinza e sistema caixa branca.

No tipo de **sistema caixa branca**, entradas e saídas são conhecidas, bem como seu funcionamento. Esses modelos não são realísticos porque, mesmo sabendo-se com exatidão as equações que regem a dinâmica do processo, sempre existirão parâmetros que têm seus valores modificados com o passar do tempo, a exemplo: temperatura, atrito, entre outros.

Quando não há conhecimento algum do processo, fala-se então de **sistema caixa preta**. Esses sistemas apresentam difícil análise algébrica de suas saídas, sua identificação é baseada em dados. Em outras palavras esse modelo é uma estrutura padrão que pode ser utilizada para aproximar uma grande variedade de sistemas.

No **sistema caixa cinza**, as entradas e saídas são conhecidas, no entanto, para o seu processo de funcionamento não se dispõem de informações suficientes, o que implica dizer que, não há conhecimento sobre todos os parâmetros que influenciam no processo. Esses modelos são mais realísticos do que o **caixa branca** (ROCHA, 2006).

As principais etapas de um processo de identificação consistem em (GUERRA, 2006):

- Realizar testes dinâmicos para coleta de dados: sabe-se que a identificação de sistemas é feita utilizando-se de dados experimentais;

- Escolher uma representação matemática para ser utilizada: existe uma extensa quantidade de representações matemáticas que podem ser utilizadas, por exemplo, os modelos orientados por blocos, polinomiais, bilineares e redes neurais artificiais. Desta forma, a escolha da representação depende do modelador, já que não existe, ainda, uma representação considerada ótima;
- Determinar a estrutura do modelo: para modelos lineares a escolha da estrutura do modelo consiste apenas em encontrar os pólos e zeros da função e a determinação do tempo morto. Em modelos não-lineares, cada tipo de não-linearidade é responsável por representar um modelo diferente. Além disso, o motivo pelo qual o modelo está sendo determinado também influencia na escolha da estrutura do modelo;
- Estimar parâmetros: escolha do algoritmo a ser utilizado para determinar parâmetros;
- Validar o modelo: quando o modelo é obtido, é necessário verificar se ele é consistente. É possível ainda fazer uma comparação entre modelos existentes e tentar decidir se há um modelo ótimo para o processo.

4.2.1 Identificação do modelo da planta

A identificação de sistemas consiste em encontrar uma expressão matemática que represente de modo satisfatório o sistema real. Essa representação é muito importante para previsão, representação, diagnóstico e controle. A Identificação do sistema em estudo é realizada em malha aberta, a uma perturbação nas variáveis em estudo. E a abordagem adaptada no presente trabalho é encontrar o modelo, com uma estrutura de determinada função de transferência, que minimize o erro médio quadrático entre a saída do modelo e os dados experimentais (WALLÉN, 1999).

As principais etapas utilizadas no processo de identificação de sistemas são descritas abaixo.

4.2.1.1 Testes dinâmicos e coletas de dados

Nesta fase se faz necessário a coleta de dados da planta em estudo, além de realizar testes dinâmicos nos mesmos. Na identificação da planta, foi utilizado o sinal de excitação Degrau, assim como o PRBS (sinais binários pseudo-randômicos), para avaliação do comportamento dinâmico com que se comportavam os dados.

Foram realizados alguns testes para verificar o comportamento de variáveis significativas para a manutenção da estabilidade do processo de produção do cloro em estudo. A Tabela 3 abaixo apresenta a escolha das variáveis manipuladas, controladas e distúrbios.

Tabela 3 – Relação das Variáveis de Entrada e Saída do Processo

Variáveis de Entrada	Carga Térmica do Refervedor de Clorofórmio
	Vazão de Cl ₂ líquido Total para o Pré Resfriador de cloro
	Vazão do Cl ₂ gás (provindo das células eletrolíticas)
Variáveis de Saída	Temperatura do Refervedor
	Temperatura do 1º estágio do Compressor
	Temperatura do 2º estágio do Compressor
	Pressão do Refervedor
	Nível do Refervedor
	Nível do Inter-resfriador
	Pressão do Inter-Resfriador
Nível do 8º estágio do Pré-resfriador	

Foram coletados os dados de entrada e saída, em uma quantidade determinada de amostras para cada caso, onde estas foram avaliadas em um intervalo de tempo entre uma e outra de 0.01 horas.

a) Teste na Vazão de Cloro Gás vindo das células eletrolíticas para o Pré Resfriador

Em alguns casos, o sinal de excitação do tipo Degrau não representa bem os dados, e ao tentar realizar ajustes matemáticos através de modelos, resultados satisfatórios não são obtidos, como poderá ser visto no Tópico (4.2.1.3 Validação).

Então, há a necessidade da escolha de novos sinais que se adaptem melhor as condições do problema em estudo.

O sinal PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence) é um tipo de sinal de excitação utilizado em muitos casos, por serem fáceis de ser gerado, como também apresentam bons resultados aos dados para validação. Visto que ele apresenta frequências diferentes em toda escala em estudo, logo consegue representar bem todo o espaço de amostragem. Ele apresenta um sinal tipo binário, ou seja, o mesmo sinal apresenta tanto degraus positivos quanto negativos. Em posse do fluxograma global do processo de produção de cloro, fornecido por (Brito, 2009), pode-se fazer a aplicação do sinal de excitação PRBS. O PRBS é encontrado na biblioteca do Aspen Dynamics, e sua utilização é de forma bastante simples.

Em todas as variáveis em estudo desse trabalho, foram realizados testes inicialmente do tipo Degrau, mas foi verificado que os mesmos não conseguiram obter validação, quando realizada a modelagem matemática, logo assim, foi então aplicado o outro sinal de excitação, do tipo PRBS, onde a partir daí conseguiu-se obter os resultados da dinâmica do processo, assim como posteriormente a Identificação do sistema.

As variáveis estudadas com esse tipo de sinal foram: Vazão de Cloro gás vindo das células para o pré-resfriador, Vazão de cloro líquido total para o Pré-resfriador e Carga térmica do Refervedor de Clorofórmio. A Figura 7 apresenta o fluxograma global do processo de produção de cloro, com a aplicação do PRBS na válvula de controle da Vazão de Cloro gás que entra no Pré-resfriador, assim como é feito para as demais variáveis contidas nesse estudo.

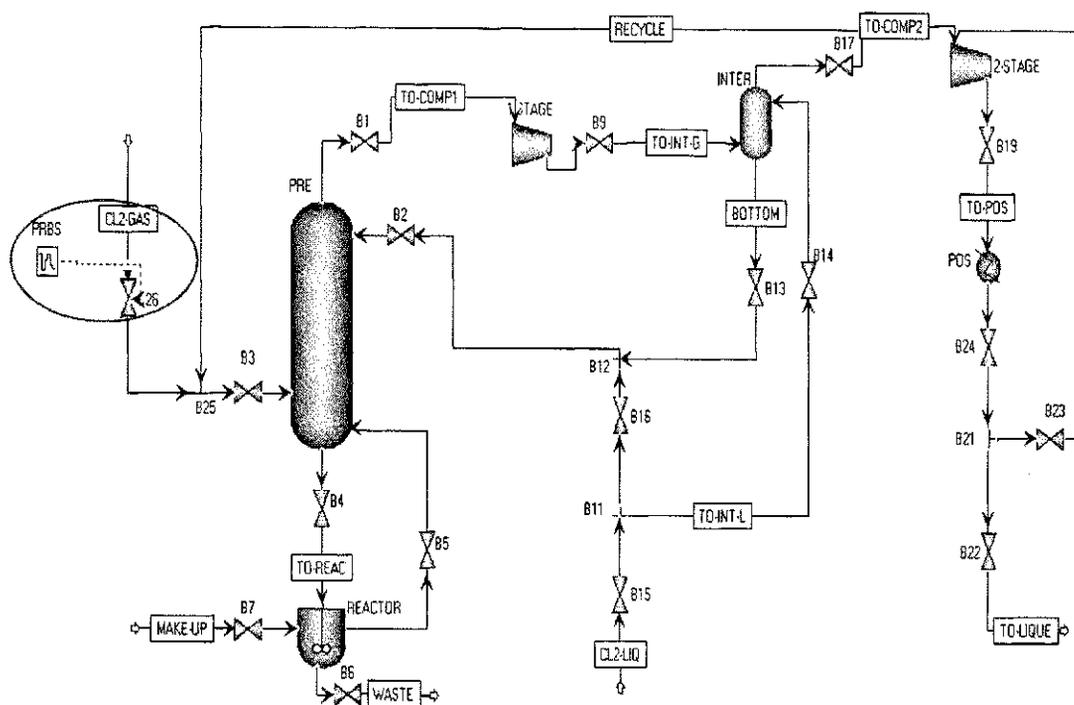


Figura 7 – Fluxograma global do processo de produção de cloro

Foram consideradas 10 horas de simulação para verificação do comportamento da variável, em resposta ao sinal de entrada (PRBS) aplicado sobre a Vazão de Cloro Gás, que possui inicialmente 39998 Kg/hr, correspondendo a uma abertura da válvula em 50%. O teste considerado melhor dentre os realizados, conteve as seguintes especificações para o PRBS, mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações do PRBS

	Valor	Unidade
Tipo de Amplitude	Fixa	
Valor de Referência	60	%
Amplitude	10	%
Período	5	min

Na Figura 8, pode ser observado que a temperatura do refervedor apresenta pequenas variações ao longo do processo. A excitação do sinal PRBS aplicado na Vazão de Cloro Gás faz com que a temperatura do Refervedor se eleve em torno de 15°C, ao longo do processo de simulação.

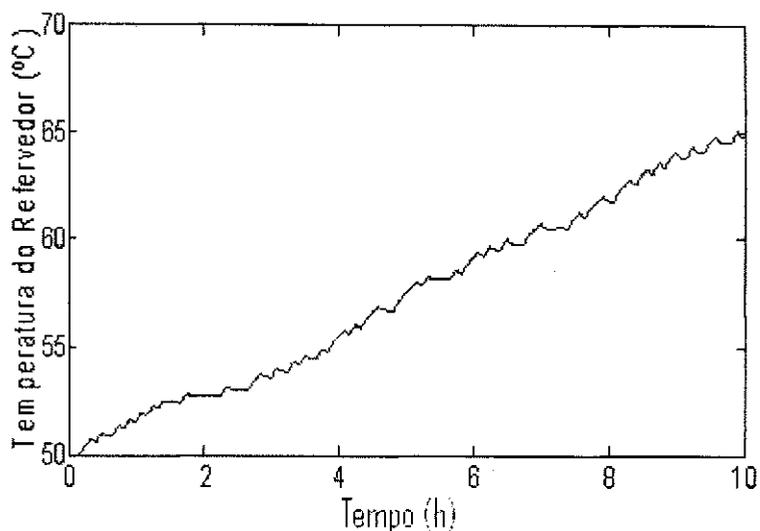
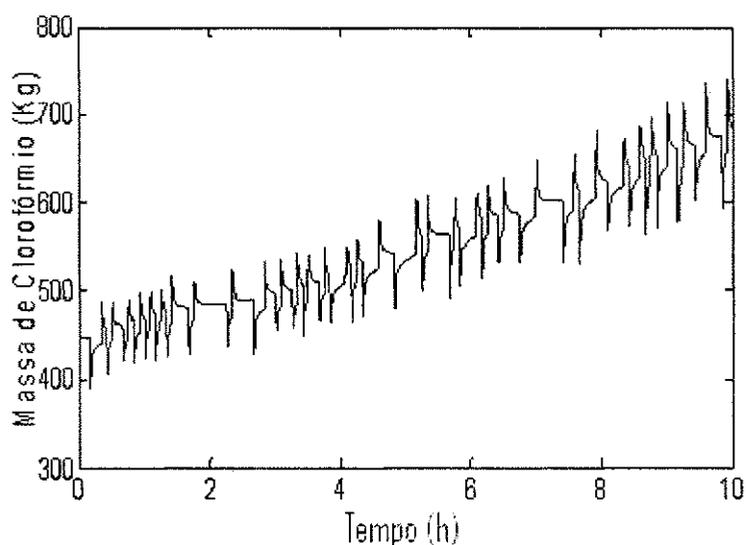


Figura 8 – Influência do Cloro Gás na temperatura do Refervedor

Na Figura 9 tanto a NCl_3 quanto o CHCl_3 sofrem variações em torno de todo o processo. A quantidade de CHCl_3 que sai do refervedor aumenta a medida que se transcorre o tempo de simulação, em decorrência da elevação da temperatura, e a quantidade de NCl_3 decai um pouco, em consequência da degradação que começa a agir na mesma. A quantidade de CHCl_3 na saída do Refervedor é em torno de 700 Kg, mas essa massa é enviada para o Pré-resfriador formando um processo de reciclo, onde a mesma retorna novamente ao Refervedor. Porém a quantidade real que é perdida na saída do topo do Pré-Resfriador é de 1.18 kg e a NCl_3 é degradada atingindo uma composição na saída do Refervedor de 69.5 ppm e na saída do Pré-Resfriador de 4 ppm.



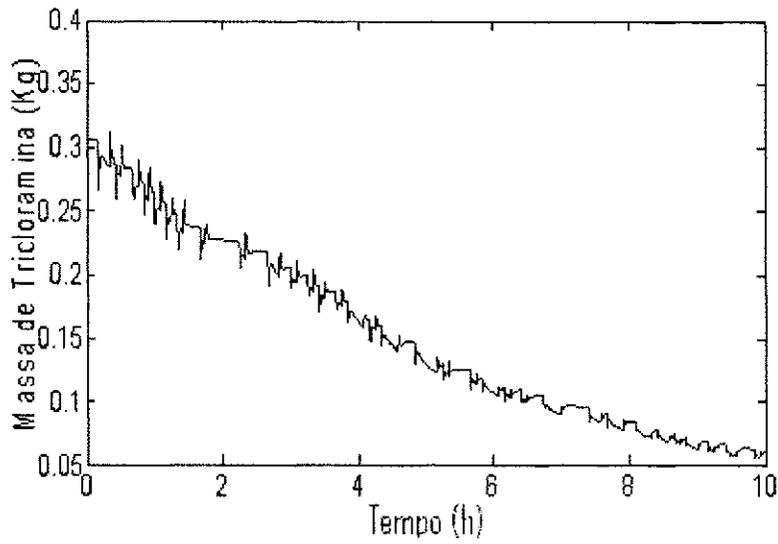
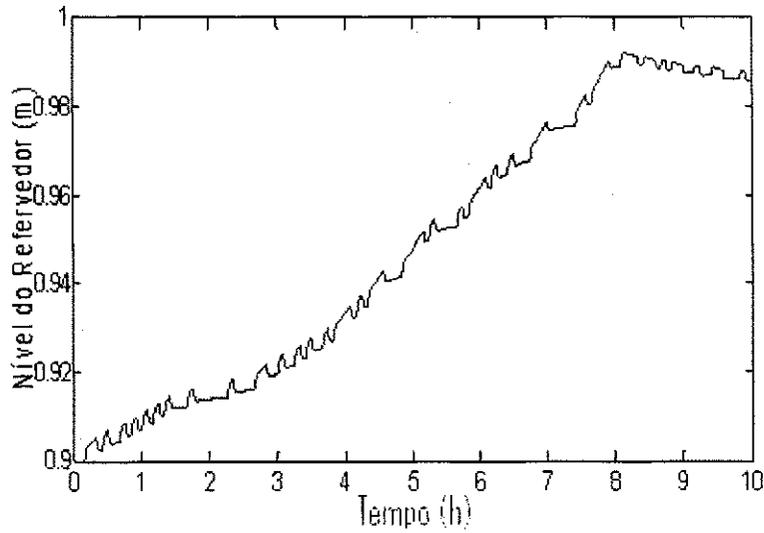


Figura 9 - Influência do Cloro Gás nas massas no interior do refervedor

O nível do refervedor apresenta um leve aumento, atingindo ~0,99 metros. Já com relação ao nível do inter-resfriador, o mesmo apresenta um decréscimo de ~0,35 metros. (Figura 10)



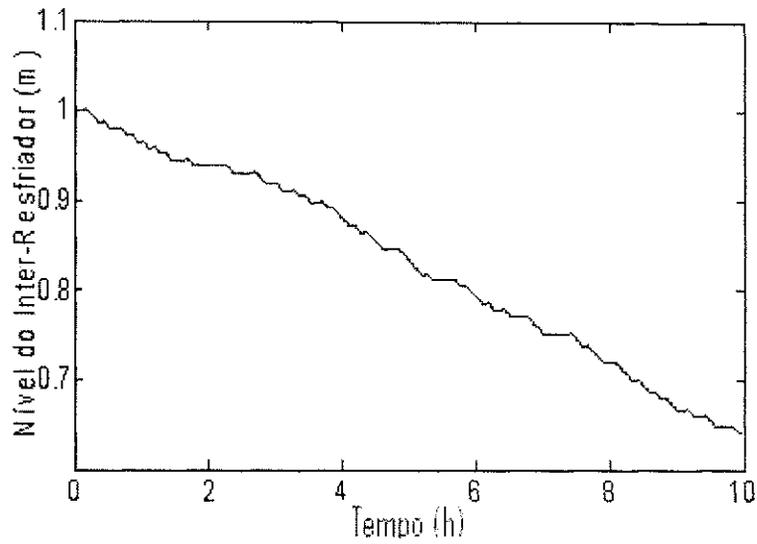
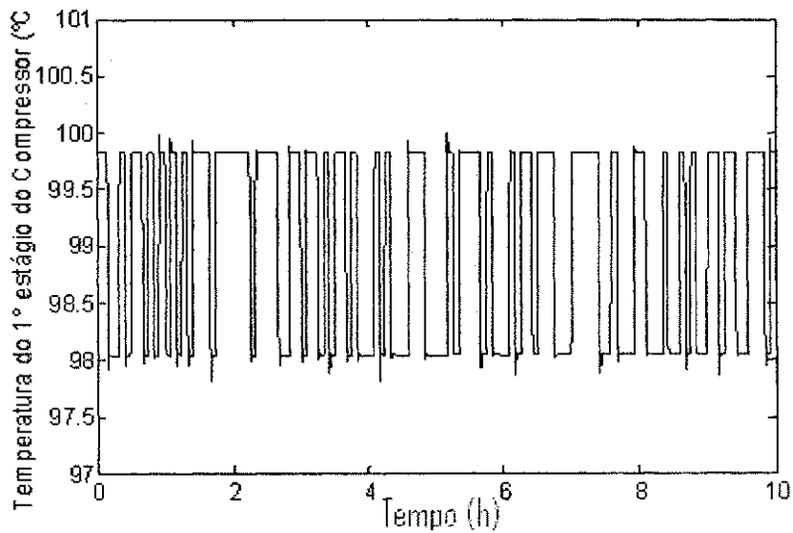


Figura 10 – Influência do Cloro Gás nos níveis do Refervedor e Inter-resfriador

O 1º e 2º estágio do compressor, como pode ser visto na Figura 11, se mantém com variações constantes, dentro da faixa permitida de operação do equipamento na planta. Não sofrendo influência significativa do sinal aplicado na Vazão de Cloro Gás. O que não causará riscos ao funcionamento do compressor na planta de produção de Cloro.



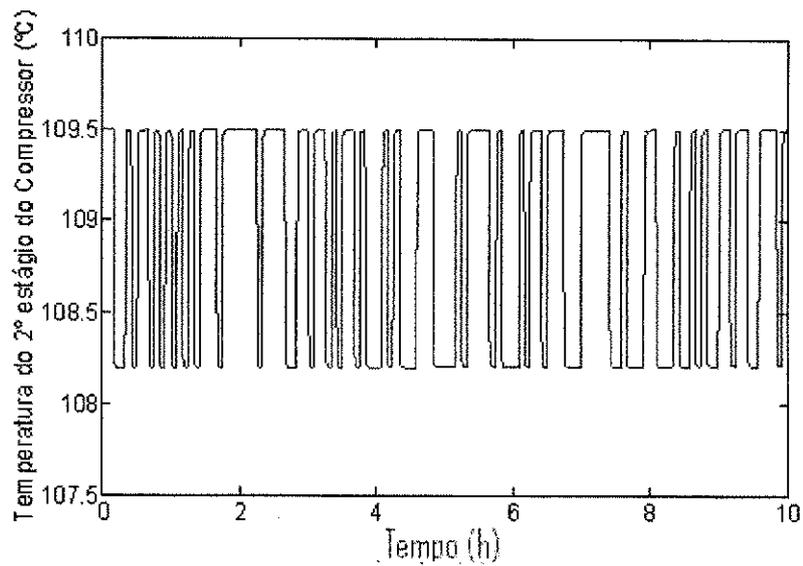


Figura 11 – Influência do Cloro Gás nas respostas das temperaturas do 1º e 2º estágio do compressor

Como pode ser visto na Figura 12, o nível do 8º estágio do Pré-Resfriador sofre forte influência da variável perturbada, chegando a um quase esvaziamento, como pode ser observado.

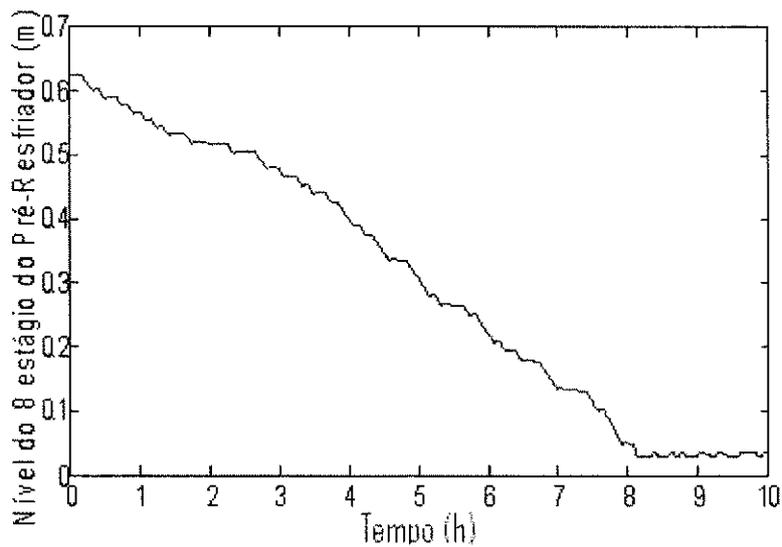


Figura 12 – Influência do Cloro Gás no nível do 8º estágio do Pré-Resfriador

O comportamento das pressões do Refervedor e do Inter-Resfriador são apresentadas na Figura 13. A pressão do refervedor sofre variação em torno de 0.035bar. Já a do Inter-Resfriador sofre variação de 0.07 bar.

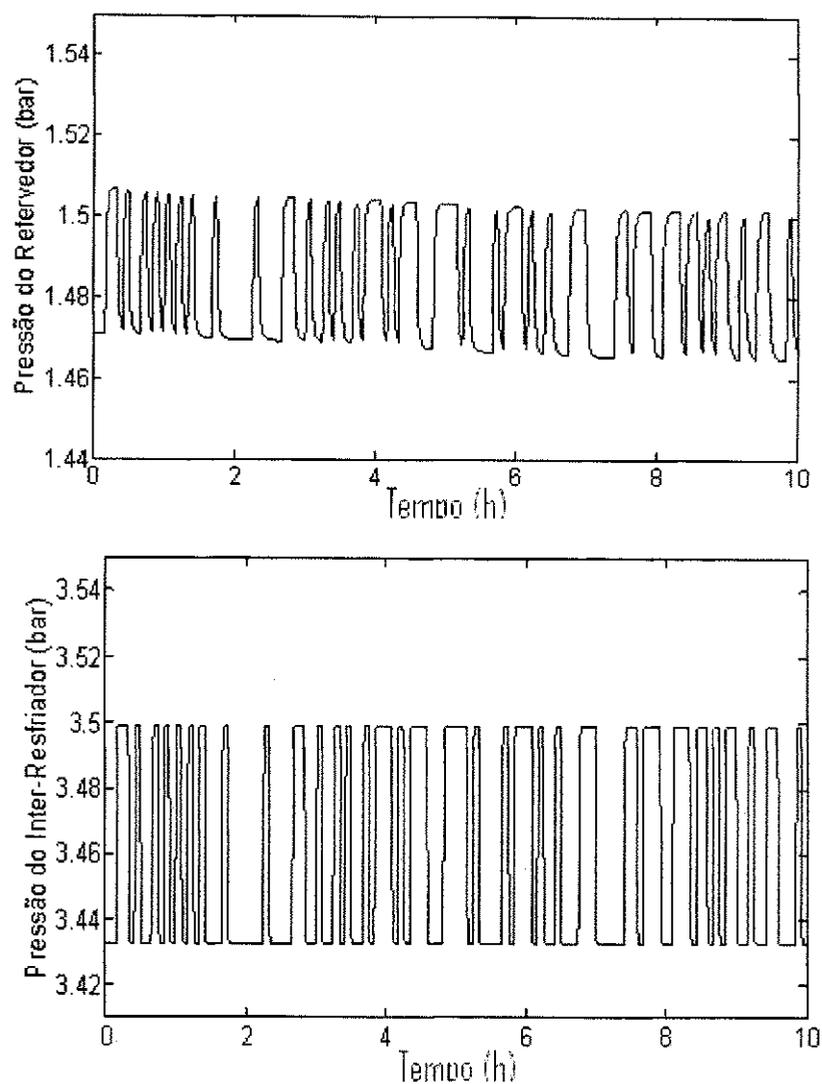


Figura 13 – Influência do Cloro Gás nas pressões de Refervedor e Inter-Resfriador

b) Teste na Carga térmica do Refervedor de Clorofórmio

O teste considerado melhor dentre os realizados, conteve as seguintes especificações para o PRBS, mostrados na Tabela 5. Aplicando essa perturbação a uma quantidade inicial de 0.228784 Gj/hr da Carga térmica.

Tabela 5 - Especificações do PRBS

	Valor	Unidade
Tipo de Amplitude	Fixa	

Valor de Referência	2.5	%
Amplitude	5	%
Período	0.6	min

A Figura 14 mostra o comportamento para a temperatura mediante a aplicação da perturbação do tipo PRBS na carga térmica do Refervedor de Clorofórmio. A mesma tem uma elevação em torno de 16°C, mostrando assim forte influência da Carga térmica do Refervedor na Temperatura.

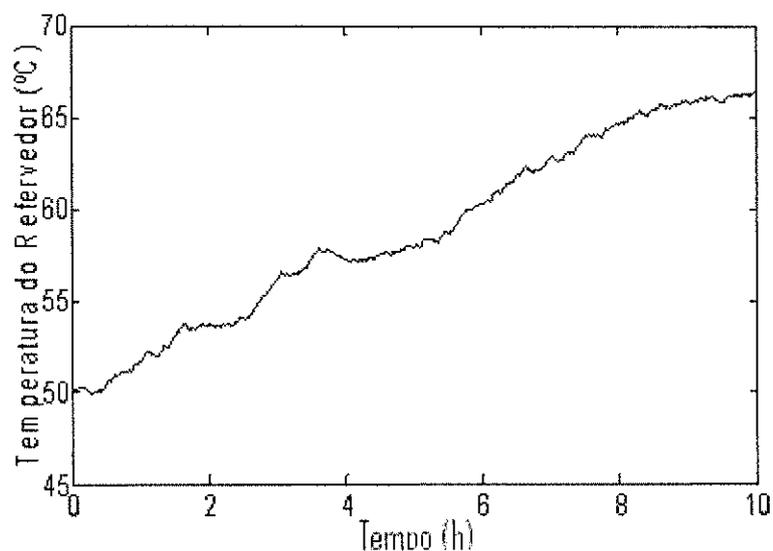


Figura 14 – Influência da Carga Térmica na temperatura do refervedor

Na Figura 15, é possível observar o comportamento das massas de NCl_3 e CHCl_3 . A massa de NCl_3 vai sendo degradada durante o tempo de amostragem. No processo, a quantidade presente no Pré-resfriador é de (~7225ppm) visto que a temperatura no equipamento é baixa, o que propicia o acúmulo do contaminante. Então é necessária sua degradação para evitar possíveis riscos e danos ao funcionamento da planta de produção do Cloro. Ao passar pelo Refervedor de degradação, essa concentração chega inicialmente a 0,3 kg de NCl_3 , que corresponde a 417 ppm (na temperatura de 50°C), chegando no final do processo a cerca de aproximadamente 69.5 ppm (~66°C) na saída do Refervedor.

O CHCl_3 apresenta elevação em sua quantidade na saída do Refervedor devido ao aumento da temperatura, fazendo com que o mesmo inicie o processo de evaporação. Com isso, ao passar do tempo, o esperado é que ele seja totalmente vaporizado, e o nível do

Refervedor baixe muito, chegando ao esvaziamento, por isso controladores de nível e outras variáveis foram adicionados para evitar esse risco. Visto que a quantidade de CHCl_3 equivale a cerca de ~90% do total do Refervedor.

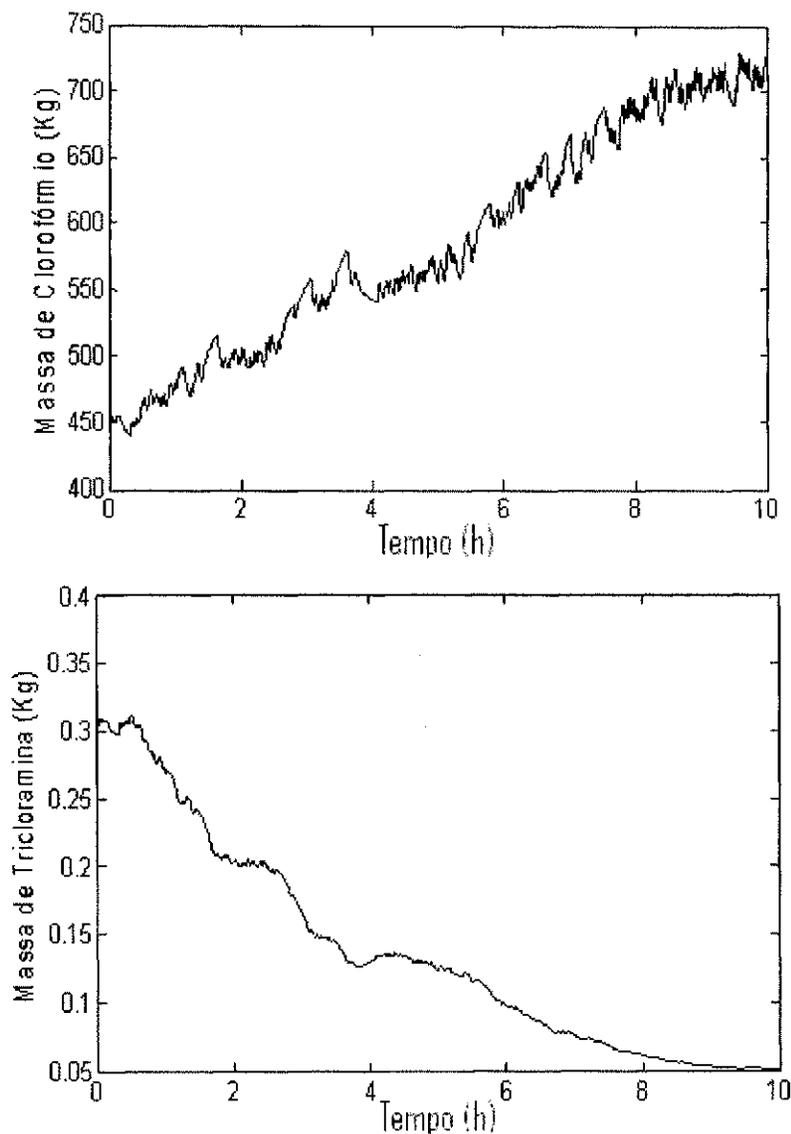


Figura 15 – Influência da Carga Térmica nas massas no interior do refervedor

O nível do refervedor sofre uma variação no tempo, correspondendo a um decréscimo de 0.6 metros. Já o nível do Inter-Resfriador praticamente não sofreu influência à perturbação aplicada. (Figura 16)

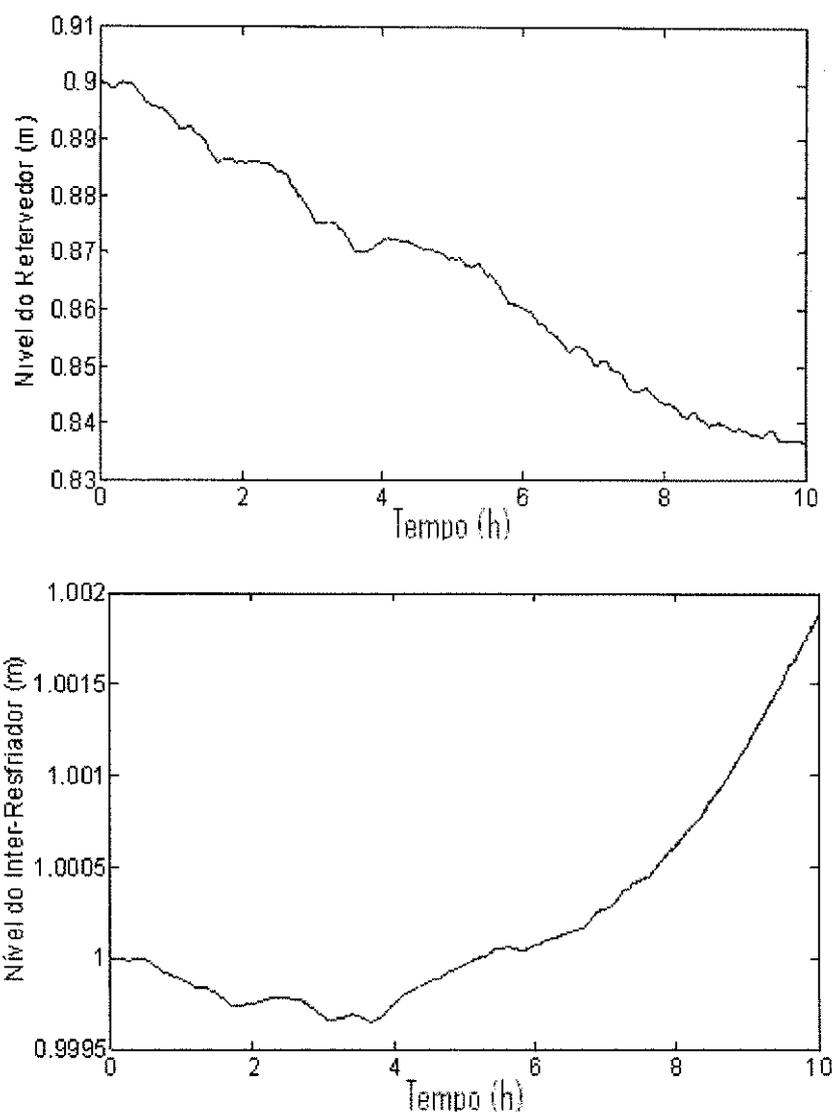


Figura 16 – Influência da Carga Térmica nos níveis do Refrator e do Inter-Resfriador

O comportamento das temperaturas do compressor (1° e 2° estágio), podem ser interpretadas através da Figura 17, logo abaixo. Em à resposta das temperaturas de descarga no 1° e no 2° estágio do compressor, pode ser verificado que uma perturbação aplicada na Carga térmica não tem influência significativa sobre estas duas variáveis, logo as mesmas comportam-se quase constantes no tempo.

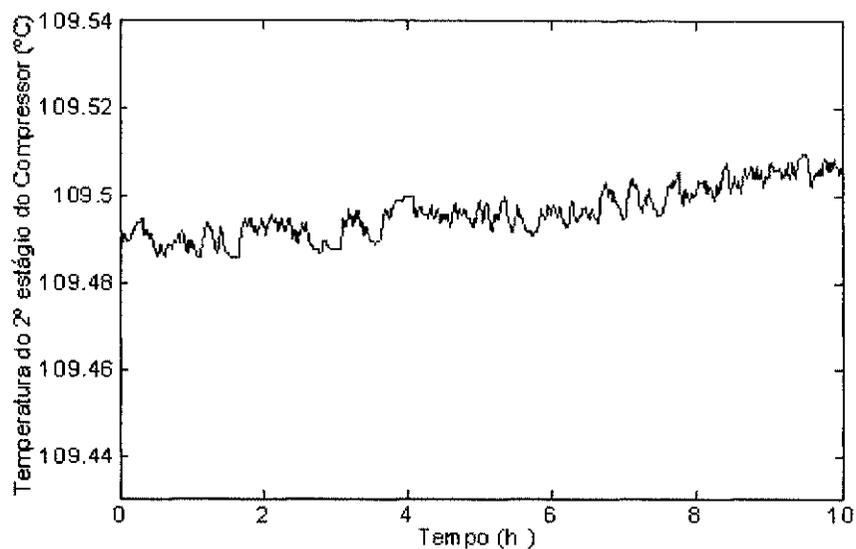
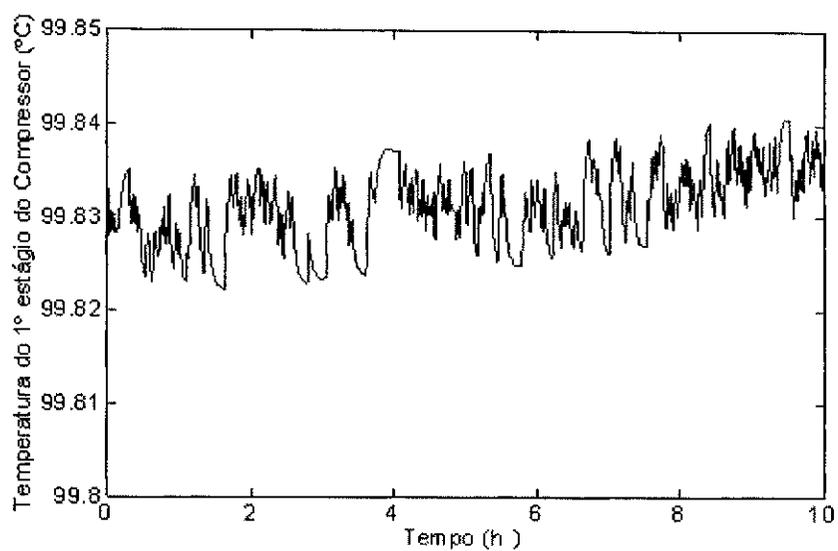


Figura 17 – Influência da Carga Térmica nas respostas das temperaturas do 1º e 2º estágio do compressor

O nível do 8º estágio do Pré-Resfriador, Figura 18, sofre forte influência da variável perturbada, elevando seu nível em ~ 0.325 metros.

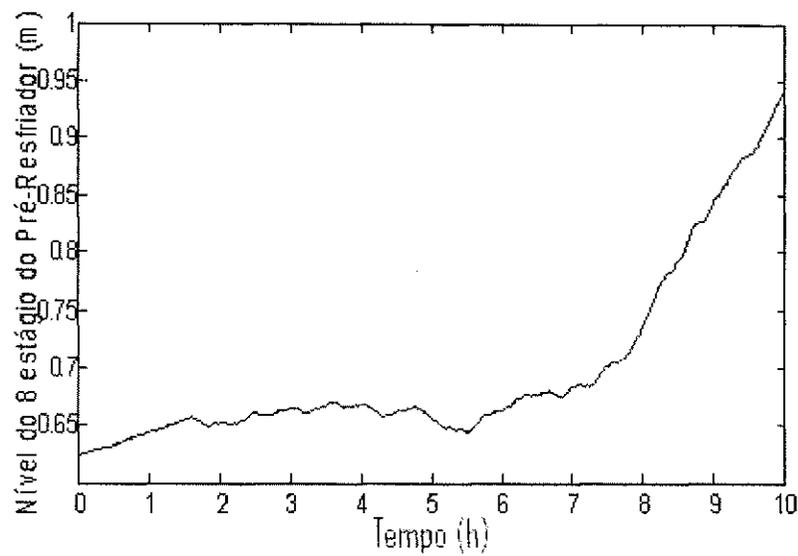
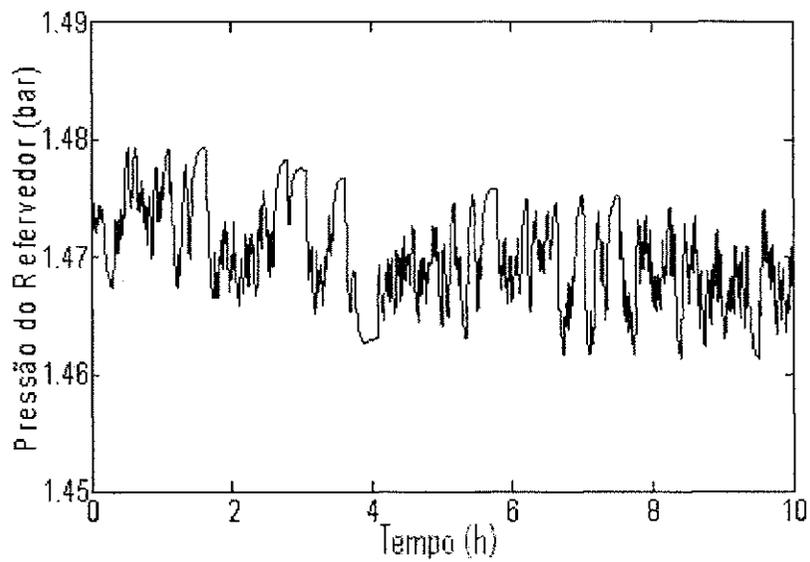


Figura 18 – Influência da Carga Térmica no nível do 8º estágio do Pré-Resfriador

As pressões do Refervedor e do Inter-Resfriador sofrem uma influência pequena da Carga térmica, como pode ser visto na Figura 19.



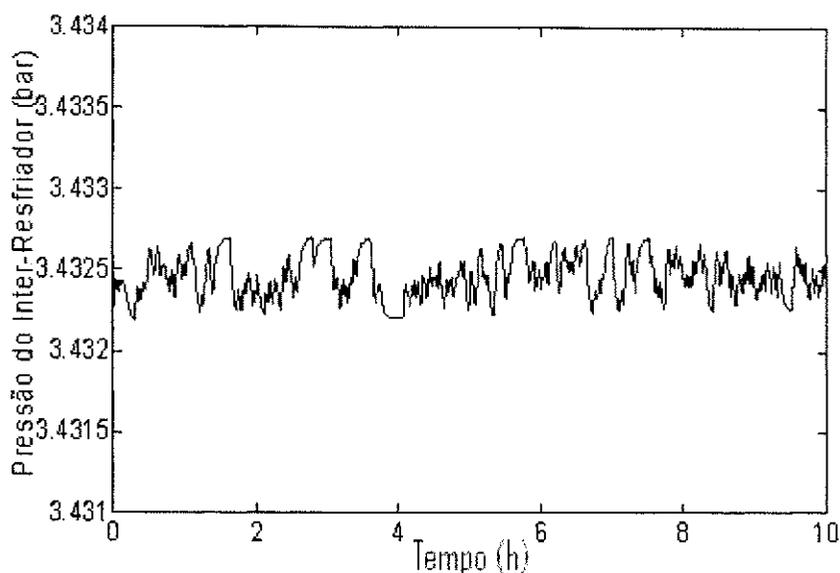


Figura 19 – Influência da Carga Térmica nas pressões do Refervedor e Inter-Resfriador

c) Teste na Vazão de Cloro Líquido Total para o Pré Resfriador

Vários testes foram feitos, com relação às especificações do PRBS. Através disso, o teste considerado melhor dentre os realizados, conteve as seguintes especificações para o PRBS, mostrados na Tabela 6. A perturbação foi aplicada sobre o valor inicial da Vazão de Cloro Líquido, correspondente a 15999 Kg/hr.

Tabela 6 – Especificações do PRBS

	Valor	Unidade
Tipo de Amplitude	Fixa	
Tipo de Amplitude	55	%
Valor de Referência	5	%
Amplitude	0.001	min

Na Figura 20, pode ser observado que a temperatura atinge 42 °C em 10 horas de simulação. Sofrendo pequenas freqüências em torno de todo o tempo de amostragem.

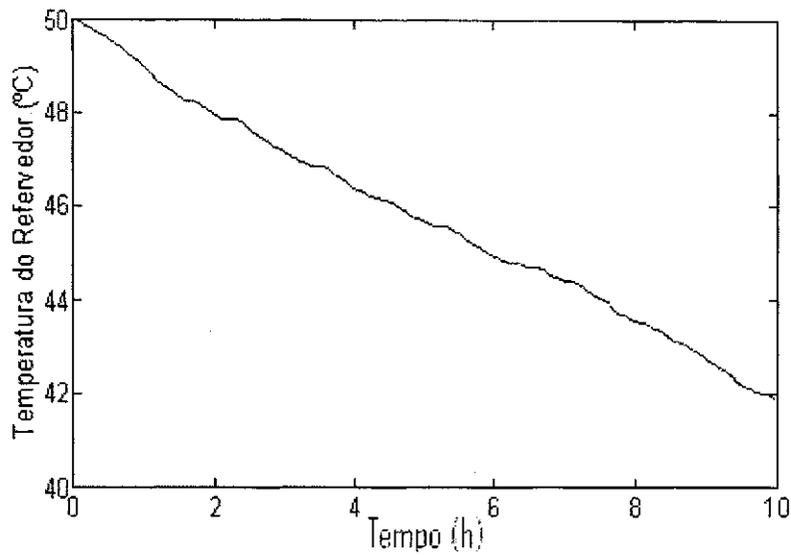
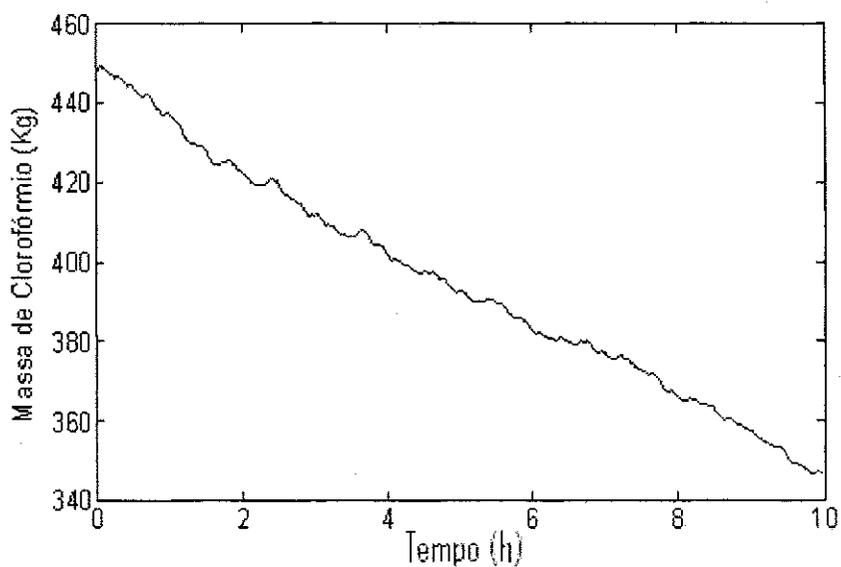


Figura 20 – Influência do Cloro Líquido na temperatura do Refervedor

A massa de CHCl_3 assim como a temperatura, apresenta pequenas freqüências durante o processo de simulação. Tendo sua evaporação reduzida em decorrência da diminuição da temperatura, o que faz com que vá se acumulando no interior do Refervedor, na Figura 21. A massa da NCl_3 obtém ao final do estudo uma composição de ~996 ppm na saída do Refervedor. Valor esse superior ao que inicialmente é obtido quando o contaminante entra no equipamento e sofre a influência dos 50°C (início da simulação). Sendo justificado pela diminuição de temperatura que ocasiona uma concentração desse composto no mesmo.



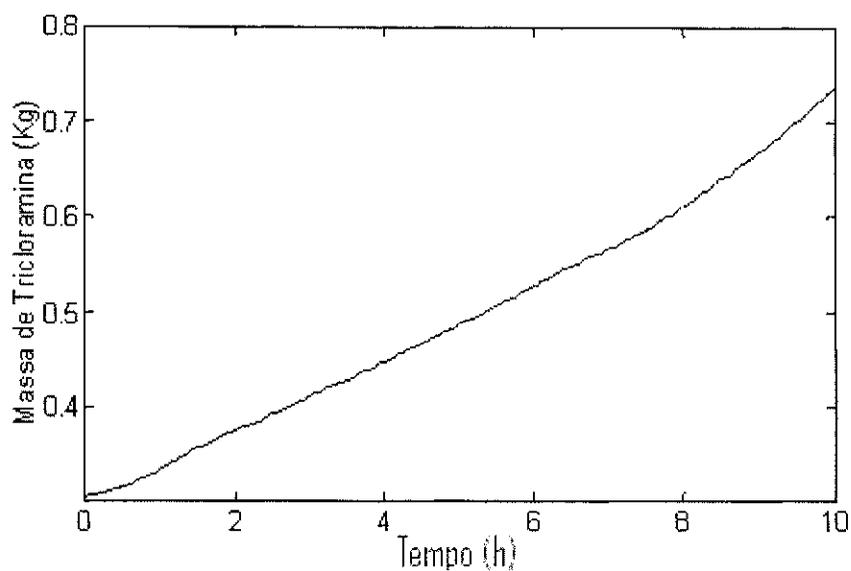
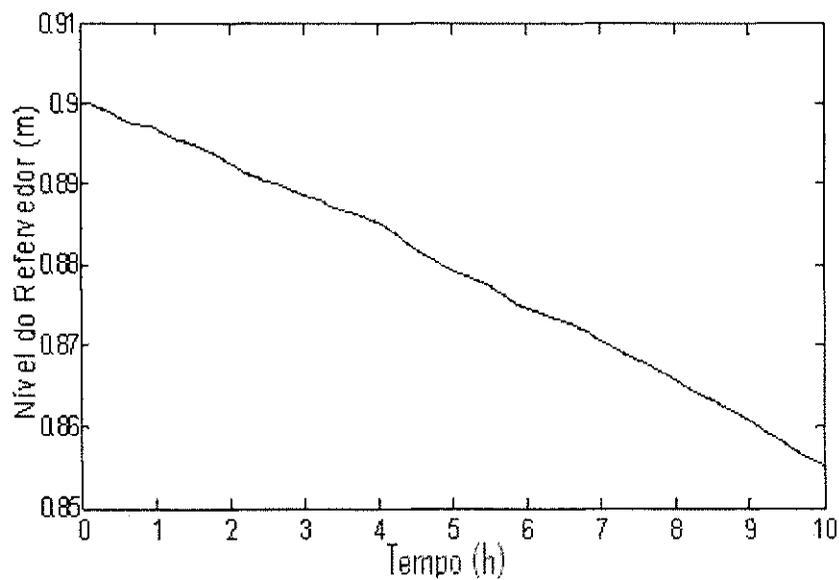


Figura 21 - Influência do Cloro Líquido nas massas no interior do refervedor

Os níveis tanto do Refervedor quanto do Inter-Resfriador sofrem pouca influência da variável perturbada, no caso a Vazão de Cloro líquido. O Refervedor sofre uma modificação em decréscimo de 0,045 metros, já o Inter-Resfriador aumentou 0,125 metros o seu nível. Como pode ser visto na Figura 22.



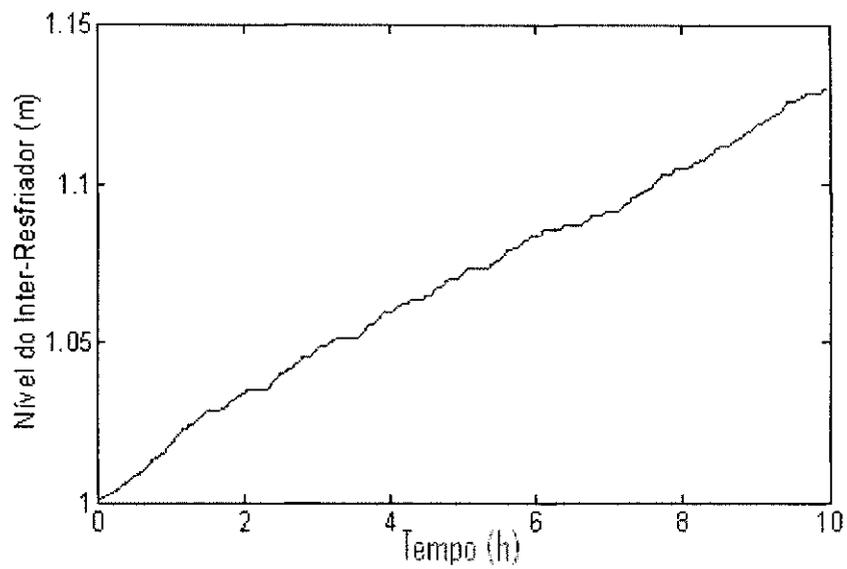
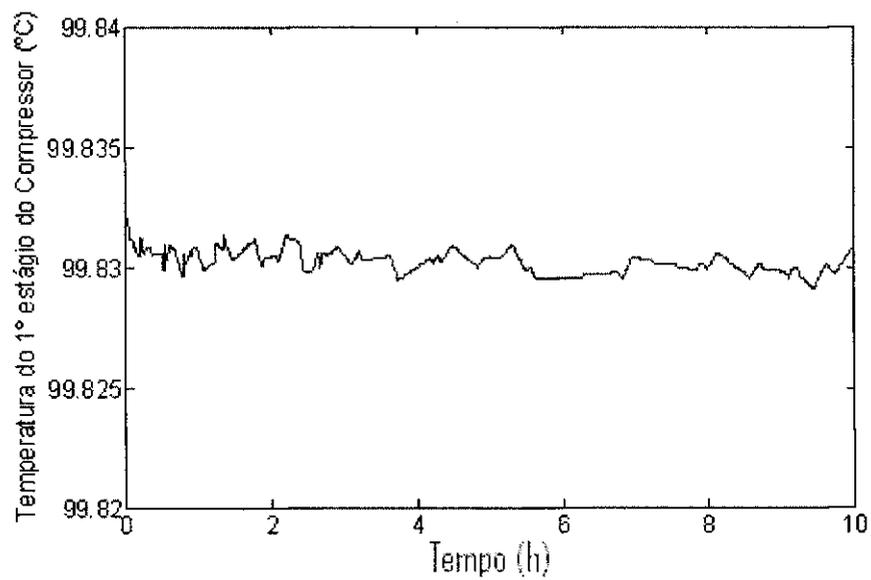


Figura 22 – Influência do Cloro Líquido nos níveis do refervedor e do Inter-Resfriador

As temperaturas do 1° e 2° estágio de compressão, como pode ser visto (Figura 23), sofrem pouquíssima influência, com a perturbação do sinal PRBS aplicado na vazão de Cloro líquido.



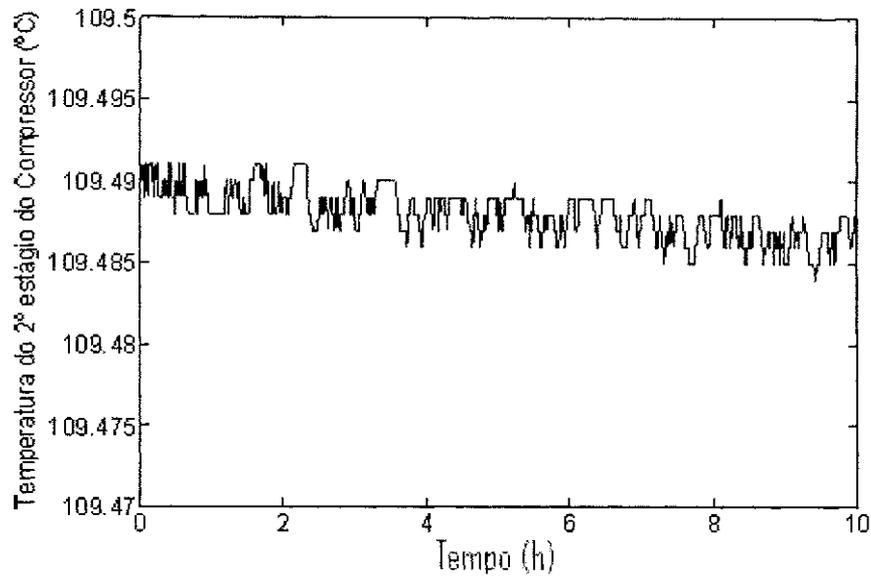
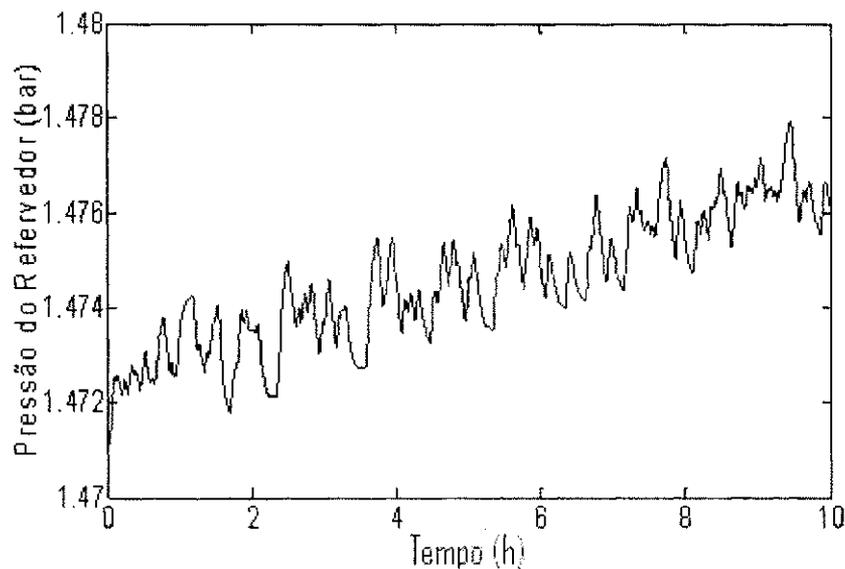


Figura 23 – Influência do Cloro Líquido nas respostas das temperaturas do 1º e 2º estágio do compressor

As pressões em ambos os equipamentos, Refervedor e Inter-Resfriador se mantêm resistentes à perturbação aplicada, sofrendo assim poucas variações. Para o Refervedor a pressão teve uma modificação na faixa de 0.005 bar. Já no Inter-Resfriador essa mesma variável praticamente não sofreu mudança em relação ao seu valor inicial. Como pode ser verificado na Figura 24.



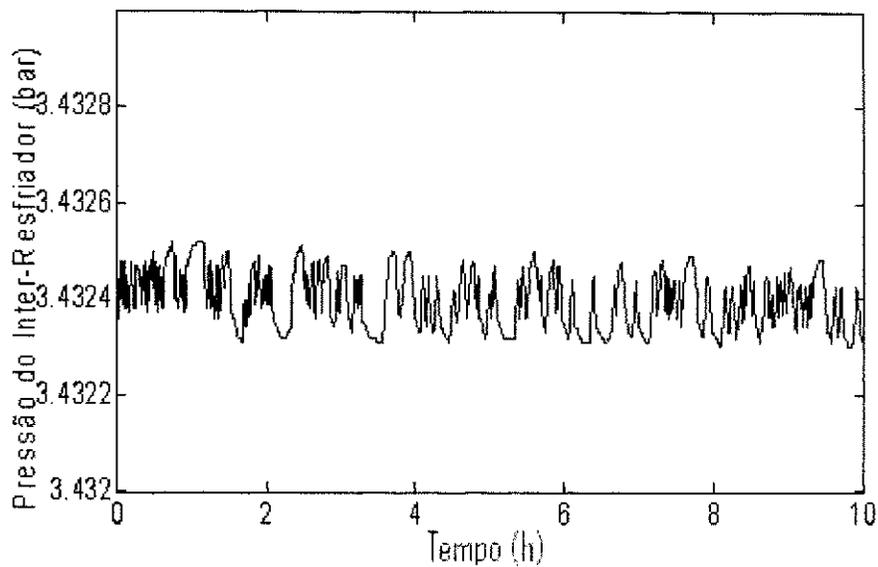


Figura 24 – Influência do Cloro Líquido nas pressões do Refervedor e Inter-Resfriador

Como pode ser visto na Figura 25, o nível do 8º estágio do Pré-Resfriador sofre uma elevação em torno de 0.3 metros, após a aplicação da perturbação na Vazão de Cloro Líquido.

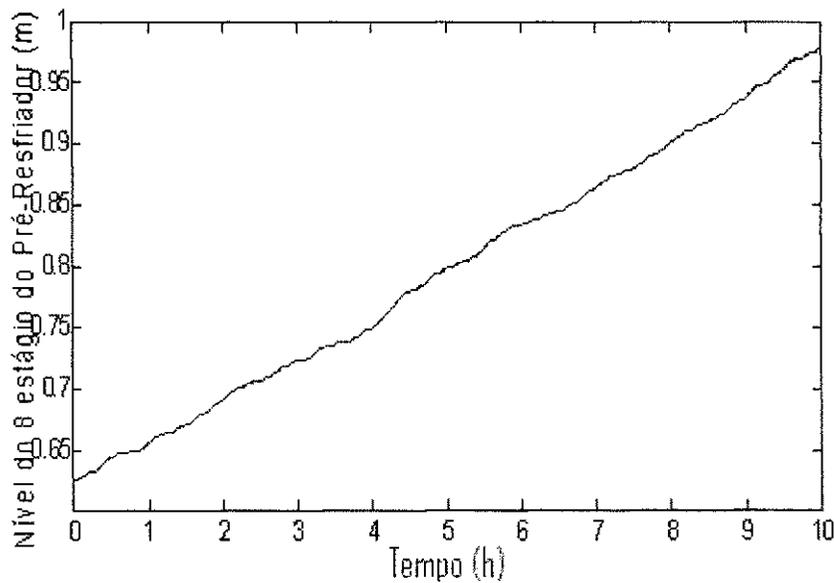


Figura 25 – Influência do Cloro Líquido no nível do 8º estágio do Pré-Resfriador

4.2.1.2 Determinação da estrutura do modelo e estimação de parâmetros

Em posse dos dados em uma tabela do Excel obtidos por simulação no Aspen Dynamics realizados durante o estudo desse trabalho, pôde-se dar início a modelagem do processo. Para a modelagem foi utilizado o programa ident, que é um toolbox do Matlab, onde este contém várias funções para processamento de dados, estimação de modelos e análise de modelos obtidos. No prompt de comando do Matlab, digitando ident o programa abrirá sua janela, como pode ser visto na Figura 26.

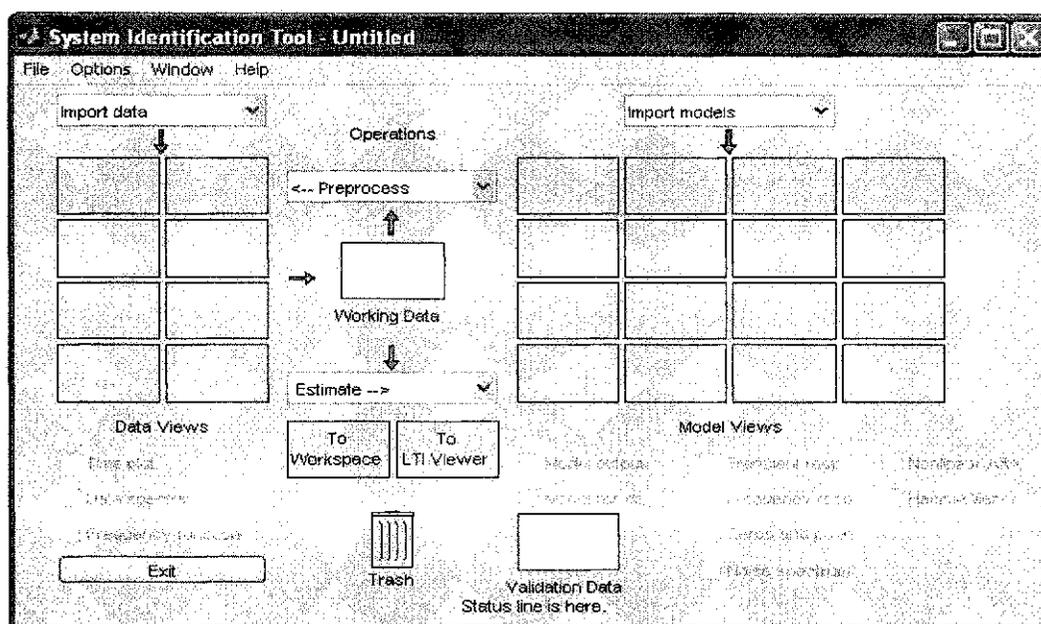


Figura 26 – Tela do Ident

Prosseguindo a identificação da planta de controle, é necessário importar os dados disponibilizados na tabela do Excel. Após isso, no command window do Matlab, identifica as variáveis de entrada e saída, da seguinte forma:

```
in = data (xi : xf, y1);  
out = data (xi : xf, y2);
```

Onde: xi = A 1ª linha do Excel de onde os dados são retirados;

xf = Última linha do Excel de onde os dados são retirados;

y1, y2 = Colunas referentes a cada variável que foi estudada;

Como os dados de entrada e saída estão no domínio do tempo eles foram importados para o Ident nesse domínio. No ident deve-se informar o tempo de amostragem, assim como o nome dos vetores de entrada e saída de dados. De acordo com a Figura 27 abaixo:

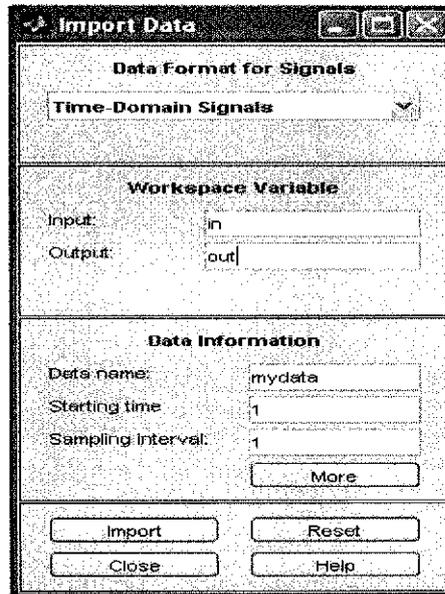


Figura 27 – Configuração dos dados de entrada

Após a identificação das amostras de entrada e saída assim como o tempo de amostragem, importando os dados, como visto anteriormente na Figura 34, surge um ícone na janela do ident, nomeado de amostras. Como pode ser verificado na Figura 28 abaixo.

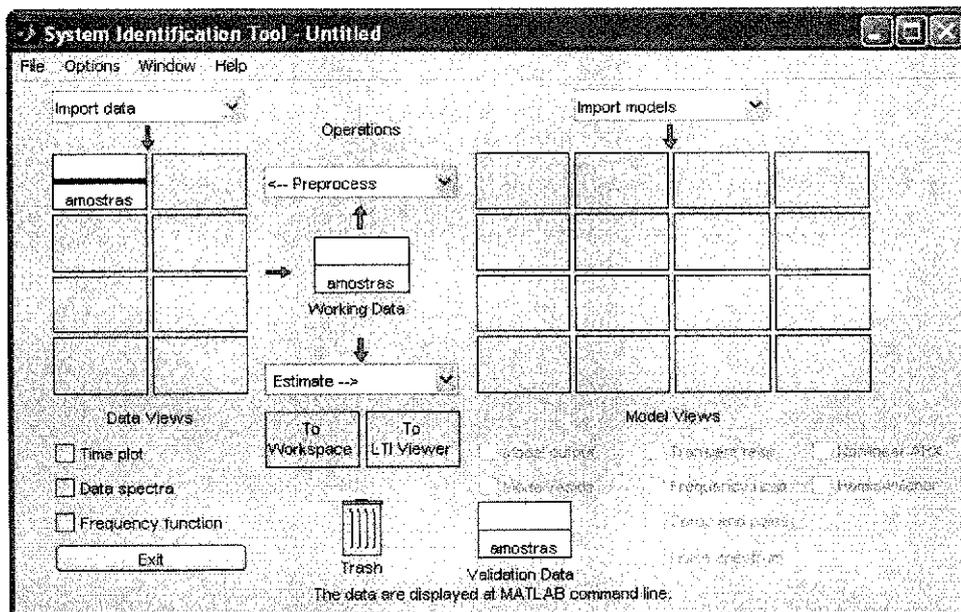


Figura 28 – Amostras importadas para o ident

O vetor **in** de entrada contém 1000 amostras, assim como o vetor **out** de saída. Foram tomadas essas quantidades de amostras necessárias em cada caso para a construção do modelo.

Foram selecionadas 500 amostras para construção do modelo, esses dados estão na janela do Ident na Figura 29, na forma de um ícone nomeado de Modelo. Como o tempo de amostragem dos dados foi de 0.01 horas, a quantidade de amostras será igual ao tempo de 5 horas. O total de amostras que representam o modelo da planta são 1000. Portanto a quantidade de 500 amostras é suficiente para a construção do modelo. As outras 500 amostras são utilizadas para validação do modelo.

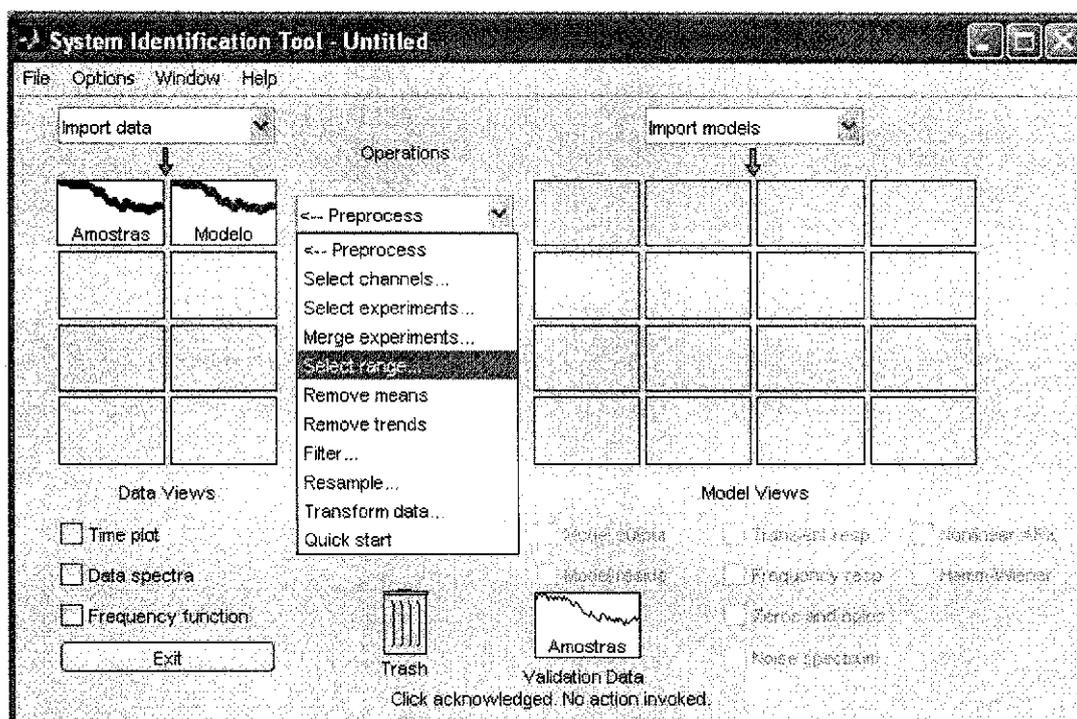


Figura 29 – Seleção das Amostras para Identificação e para Validação

Na caixa de estimativa do Ident, são selecionados os tipos de modelos, para então analisar, qual o que melhor se ajusta aos dados. Os modelos observados que melhor representou o comportamento dinâmico dos dados, foram o Process models, onde este se refere a Funções de Transferência, o Linear parametric models que corresponde ao modelo discreto ARX e o State Space (Espaço de estados). Como podem ser observados na Figura 30.

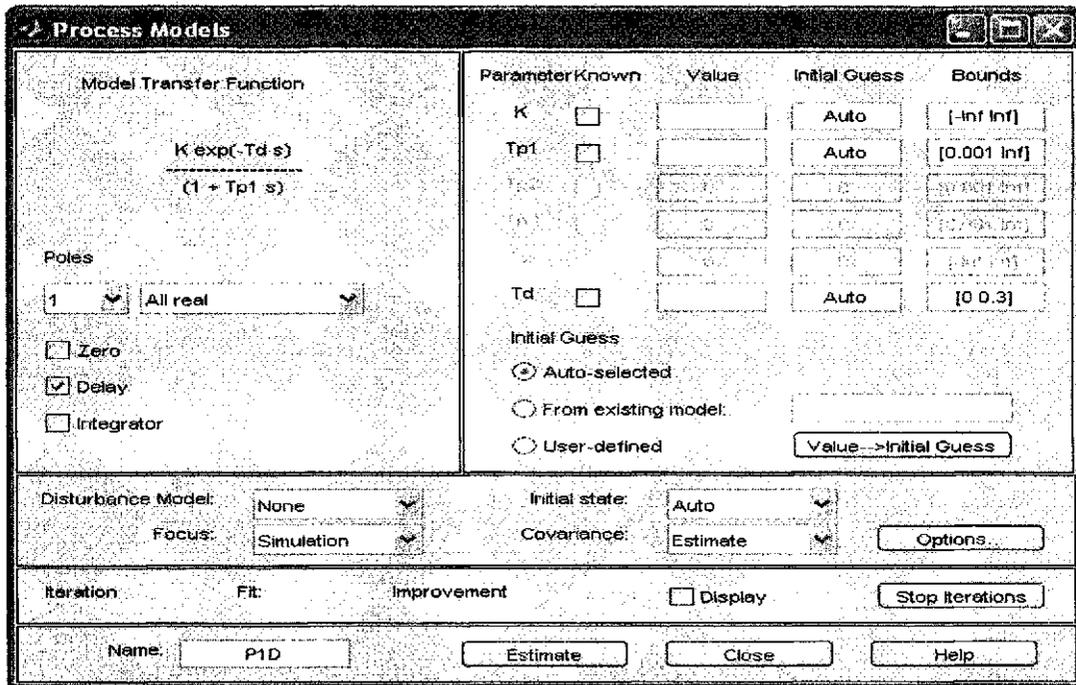
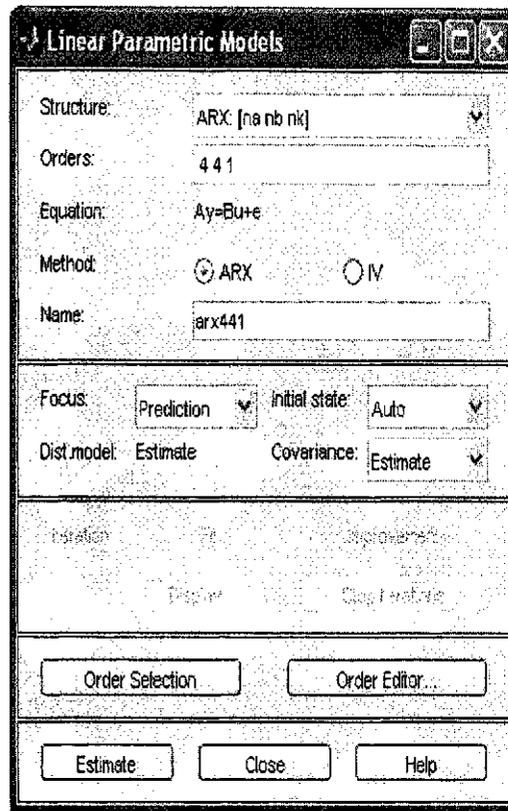
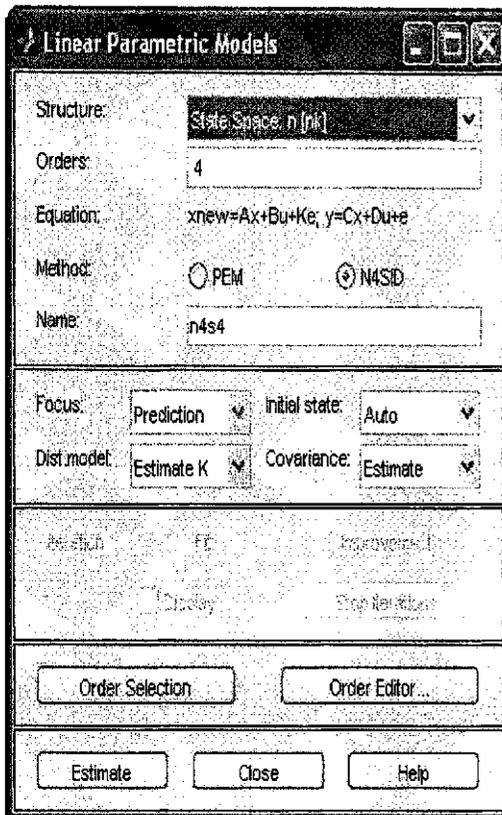


Figura 30 – Configuração dos parâmetros através dos modelos: Espaço de estados, ARX e FT

Na estimação de parâmetros usando o modelo ARX (autoregressive with exogenous inputs), a estrutura do modelo se dá inserindo o número de pólos, zeros e atrasos, o que

corresponde respectivamente aos valores 4 4 1 na caixa Linear parametric models, visto na Figura 30. Esses valores de pólos, zeros e atrasos, variam de acordo com o ajuste do modelo aos dados. A estrutura do modelo ARX, baseia-se na tendência dos mínimos quadrados. A estimação de parâmetros utilizando o Modelo representado por FT identifica a ordem do processo, informa se o sistema contém zeros, atrasos e se apresenta comportamento integrador. Já a representação no Espaço de estados, descreve a dinâmica entre duas ou mais variáveis, denominadas entrada e saída.

4.2.1.3 Validação

Antes da construção do modelo de saída é preciso selecionar uma quantidade de amostras do total de 1000 para validação. Com essas amostras serão construídos modelos distintos. Para validação foram selecionadas as últimas 500 amostras, do número 500 a 1000. Um ícone nomeado de validação surgira na tela do Ident, como pode ser visto na Figura 31.

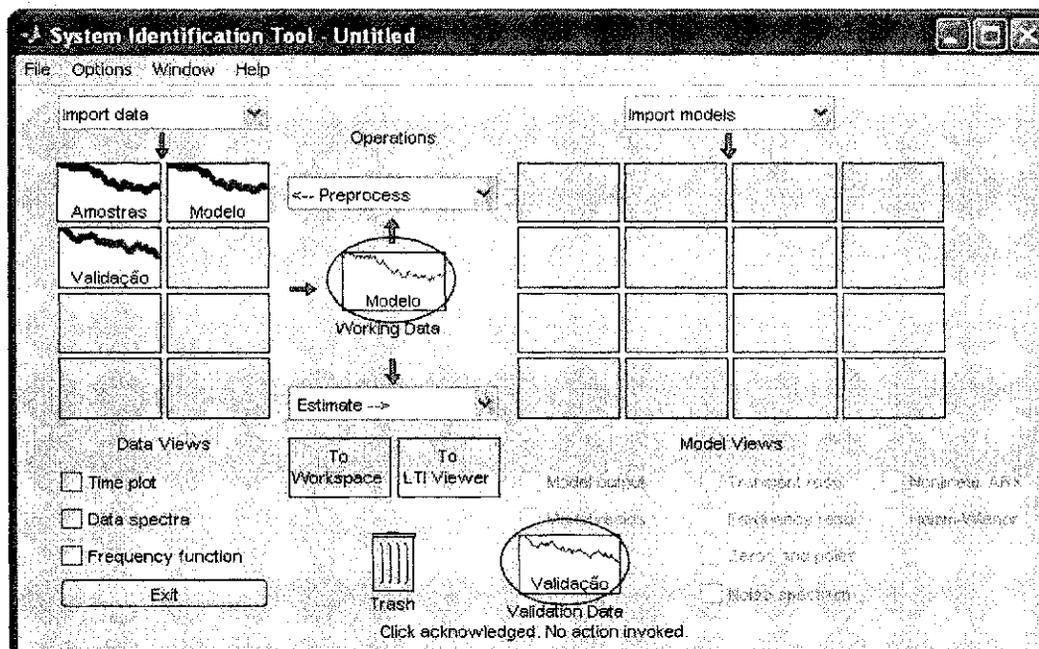


Figura 31 – Ident processo de validação

Após a seleção dessas amostras pode-se encontrar o modelo desejado. O Ident gera diferentes números de pólos, zeros, atrasos para o ARX, assim como, parâmetros diversos para a FT e o Espaço de estados. Assim, faz-se uma comparação entre os modelos gerados,

para que se possa obter o modelo que melhor se ajuste a saída do modelo referente aos dados medidos na planta. Os modelos surgem na forma de ícones, para a modelagem da planta de controle de temperatura foram propostos vários modelos. Um exemplo pode ser verificado na Figura 32, na janela do ident, de como os modelos propostos são mostrados.

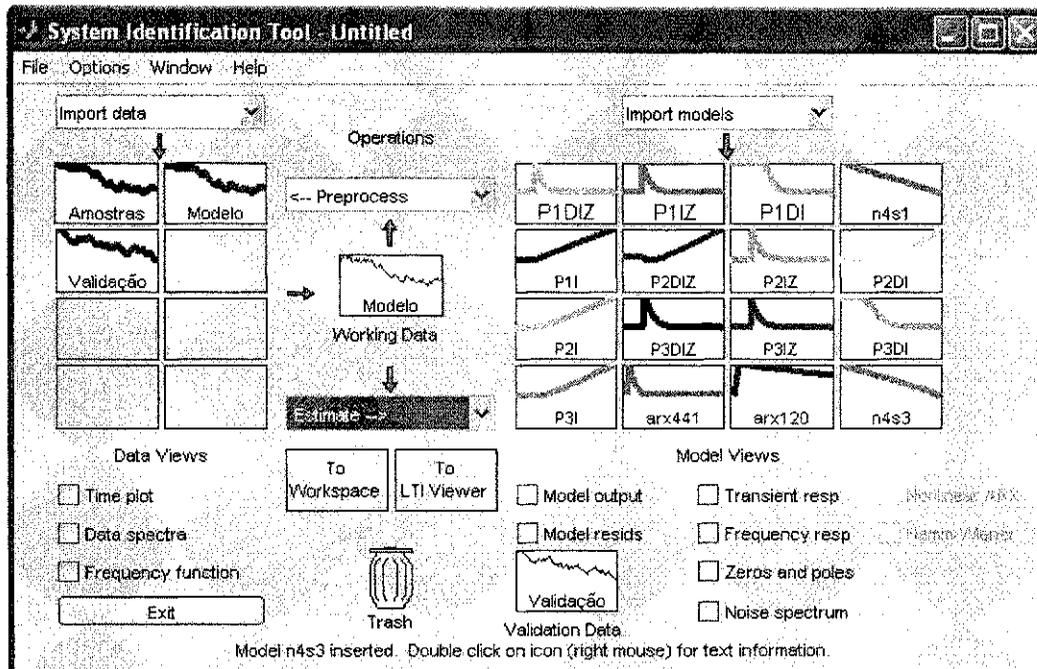


Figura 32 – Processo de escolha do modelo no Ident

Em cada uma das variáveis analisadas, foi feita uma validação nos dados correspondentes a cada perturbação do sinal PRBS aplicado. Em seguida são apresentadas as validações correspondentes a cada vazão estudada do processo.

a) Vazão de Cloro gás vindo das células eletrolíticas para o Pré Resfriador

A Figura 33 apresenta um teste para validação quando se é aplicado sinais de excitação de mesmo valor, possuindo valores contrários, à Vazão ou variável desejada a ser analisada. Ou seja, aplicação do sinal de excitação Degrau.

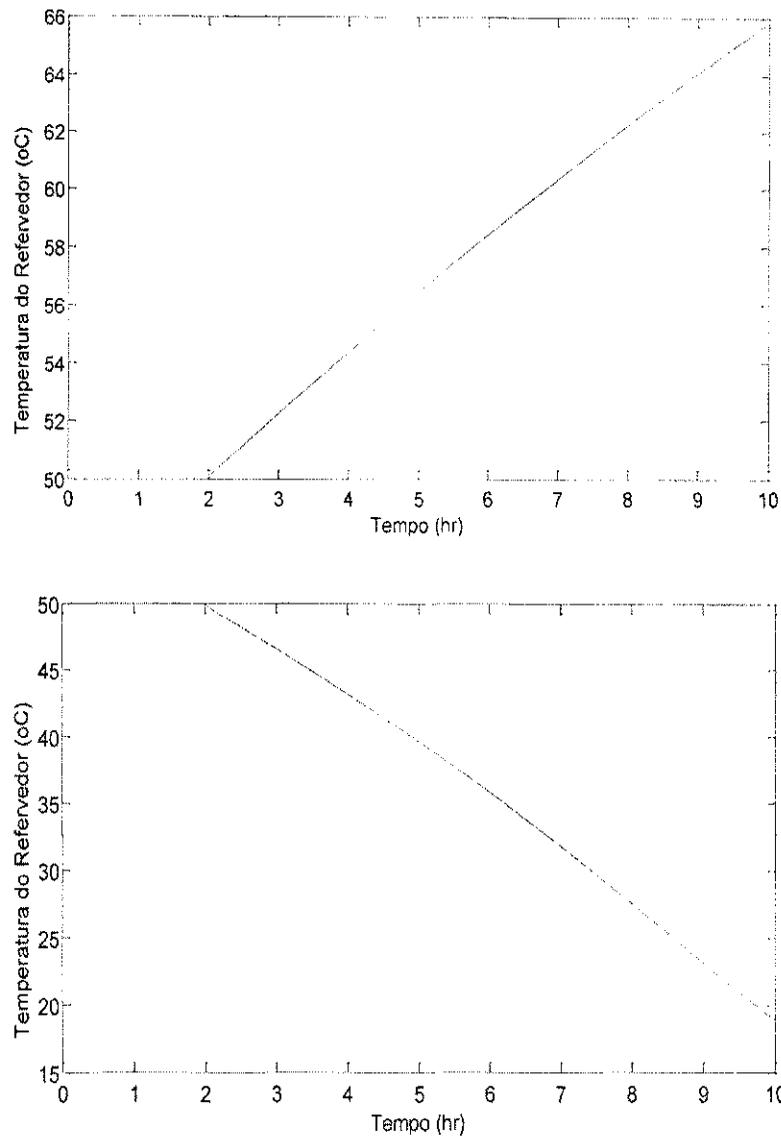


Figura 33 – Comportamento da Temperatura do Refervedor à perturbações tipo Degrau a um desvio de (+10%) e (-10%), respectivamente, na Vazão do Cloro Gás

Como pode ser verificado, ao aplicar um Degrau (+) e outro (-), os comportamentos deveriam ser inversamente semelhantes, para que pudesse encontrar um único modelo que os representasse, mas na realidade não é o que ocorre. O comportamento transiente obtido pelo Degrau de -10% apresenta um retardo na resposta em relação ao outro Degrau aplicado (+10%), possuindo um efeito de curvatura maior, logo o seu modelo é diferente quando comparado ao dos dados obtidos pelo desvio positivo. Não conseguindo assim obter um modelo único de a esses dados obtidos pela perturbação do tipo Degrau.

O sinal de excitação utilizado para esta variável foi o PRBS. A entrada e saída do processo para estimação são mostradas graficamente, na Figura 34. Onde u_1 corresponde a Vazão de Cloro Gás, e y_1 a Temperatura do Refervedor.

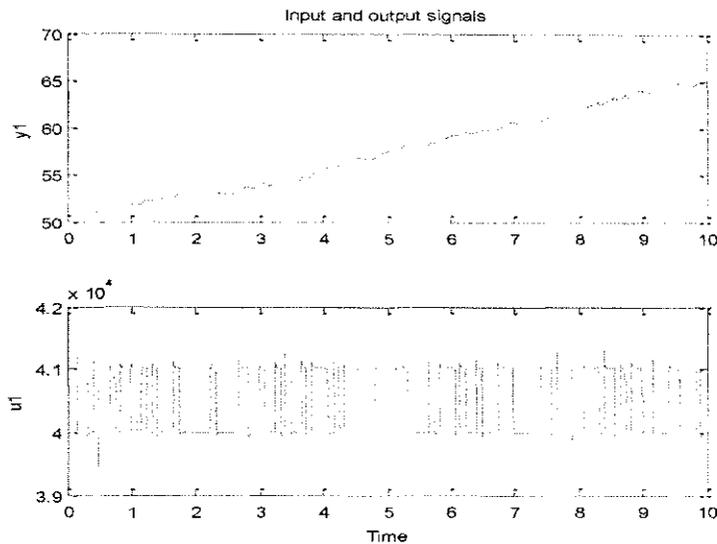


Figura 34 - Dados de Entrada (Vazão de Cloro Gás) – Saída (Temperatura do Refervedor) do Processo, correspondentes às mudanças no set point da vazão de alimentação provocadas pelo elemento PRBS.

Na Figura 35, na janela do ident, são vistos todos os modelos propostos.

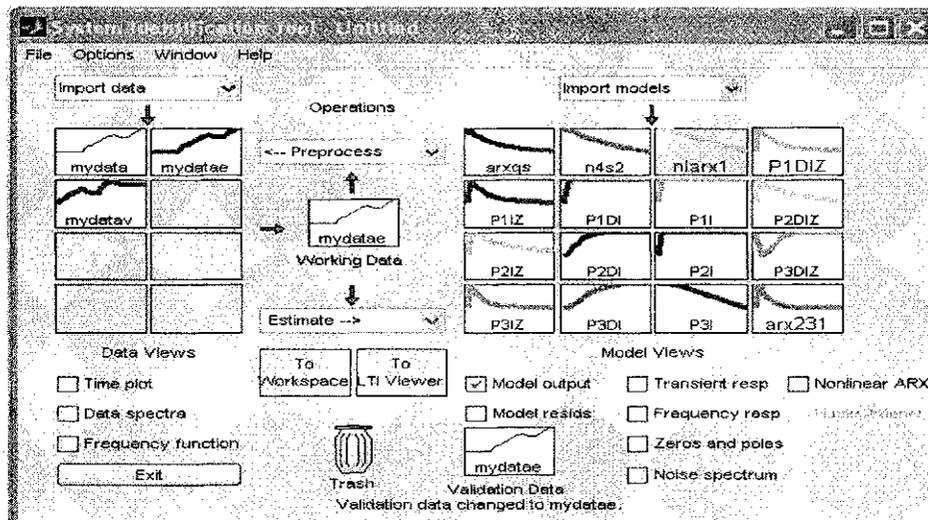


Figura 35 - Modelos matemáticos obtidos pela ferramenta ident para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Vazão de Cloro Gás

Os modelos representados pela nomenclatura P_i DIZ, P_i IZ, são as chamadas Funções de Transferência. O $arx(ijk)$ são os modelos ARX, e o $nisj$, é o que representa o modelo Espaço de Estados. A Figura 36 apresenta todos os modelos selecionados para ajuste dos dados.

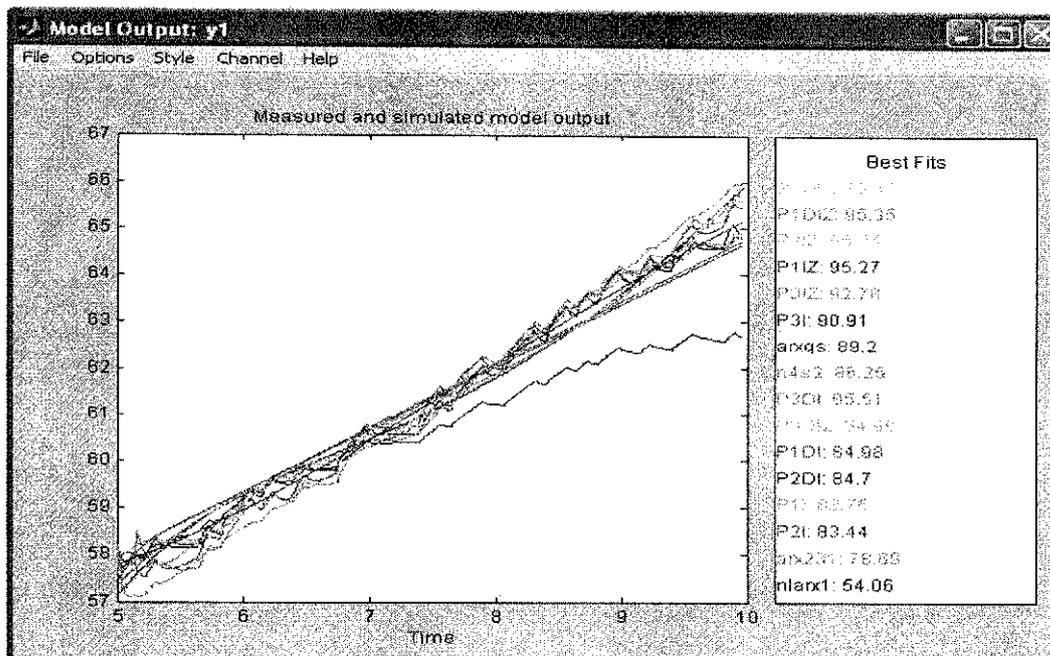


Figura 36 - Resposta de todos os modelos selecionados para temperatura do Refervedor à uma perturbação na Vazão de cloro Gás

O melhor modelo ajustado aos dados foi o P1DIZ, como mostrado na Figura 37, abaixo.

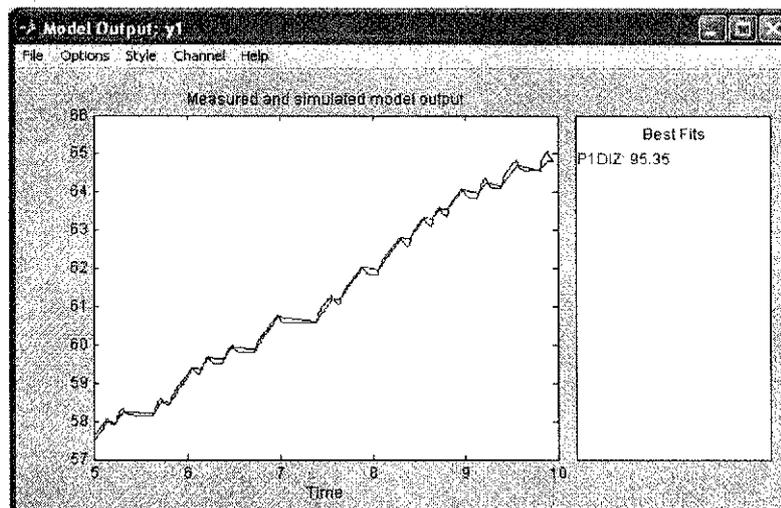


Figura 37 – Resposta ao modelo escolhido correspondente a temperatura do Refervedor à uma perturbação na Vazão de cloro Gás

Apesar de aparentemente o modelo P2DIZ dentre os validados apresentar o melhor fator de correlação, isso não confirma que ele seja o melhor modelo que represente o perfil dos dados, logo é necessário, além disso, uma avaliação dos parâmetros obtidos através dos modelos apresentados, analisando assim, o ganho, as constantes de tempo, e assim confirmar o que melhor se ajusta aos dados. Com isso, pôde-se confirmar que o modelo de

1ª ordem, foi o melhor adaptado aos dados. Assim como foi realizado o procedimento para a influência da Vazão do Cloro Gás na Temperatura do Refervedor, foi feito para as demais variáveis o mesmo estudo. Obtendo assim as seguintes FT's. O Nível do Refervedor obteve como modelo uma função de transferência de 1ª ordem contendo pólo, zero, tempo morto e comportamento Integrador. O Nível do Inter-Resfriador obteve como modelo uma função de transferência de 3ª ordem contendo pólo, zero e comportamento Integrador. A Pressão do Refervedor apresenta uma função de transferência de 2ª ordem contendo pólos, zero e comportamento Integrador. A Pressão do Inter-Resfriador apresenta um modelo do tipo Arx450, é mostrada na Tabela 7. Nível do 8º estágio do Pré-Resfriador apresenta uma FT de 2ª ordem, contendo pólo, zero e comportamento Integrador. A Temperatura do 1º estágio do Compressor apresenta uma FT de 1ª ordem, com pólo e zero, além de possuir comportamento Integrador. A Temperatura do 2º estágio do Compressor apresenta um modelo do tipo Arx550.

Tabela 7 – Representações matemáticas correspondentes as Variáveis do Processo

Variáveis do Processo	Modelos matemáticos (FT e ARX)
Temperatura do Refervedor	$G(s) = 2.5442 \times 10^{-5} \frac{(811.25s + 1)}{s(1 + 5.5413s)}$
Nível do Refervedor	$G(s) = 2.7779 \times 10^{-7} \frac{(364.92s + 1)}{s(1 + 4.3166s)(0.001s + 1)}$
Pressão do Inter Resfriador	$(1 - 0.3161 q^{-1} - 0.264 q^{-2} - 0.2451 q^{-3} - 0.09015 q^{-4}) \times y(t) = (4.918e^{-5} - 1.839e^{-6} q^{-1} - 1.544e^{-5} q^{-2} - 1.501e^{-5} q^{-3} - 9.647e^{-6} q^{-4}) \times u(t) + e(t)$
Nível do Inter Resfriador	$G(s) = -5.7596 \times 10^{-7} \frac{(1351.9s + 1)}{s(1 + 0.010578s)(1 + 9.5117s)(1 + 0.01086s)}$
Nível do 8º estágio do Compressor	$G(s) = -1.5777 \times 10^{-6} \frac{(186.83s + 1) \exp(-0.18461s)}{s(1 + 2.6342s)}$
Temperatura do 1º estágio do Compressor	$G(s) = -2.7928 \times 10^{-7} \frac{(5357.1s + 1)}{s(0.001s + 1)}$
Temperatura do 2º estágio do Compressor	$(1 - 0.4401 q^{-1} - 0.1993 q^{-2} - 0.2206 q^{-3} - 0.1738 q^{-4} + 0.035 q^{-5}) \times y(t) = (-0.0008388 + 4.701e^{-5} q^{-1} + 0.0002794 q^{-2} + 0.0002503 q^{-3} + 0.0002652 q^{-4}) \times u(t) + e(t)$

Pressão do Refervedor

$$G(s) = -1.801 \times 10^{-8} \frac{(-1777.3s + 1)}{s(1 + 0.012625s)(1 + 0.001s)}$$

Apesar dos valores apresentados para os ganhos encontrados serem pequenos, as variáveis de saída aqui apresentadas, sofrem alterações que provocam uma instabilidade no funcionamento do processo. Fator este, relacionado ao alto valor do tempo de avanço (zero da FT) existente, que segundo a literatura (MARUYAMA, 2007) apresentam uma margem na influência da estabilidade do processo. Neste caso, há um sobresinal ou undershoot que causa impacto significativo na resposta transitória. As variáveis que necessitam de controle, após uma perturbação na Vazão de Cloro Gás foram: Temperatura do Refervedor, Nível do 8º estágio do Compressor, Nível do Refervedor, Nível do Inter-Resfriador, Pressão do Refervedor e do Inter-Resfriador.

b) Carga térmica do Refervedor de Clorofórmio

Vários testes foram realizados, com aleatórios valores de especificações do PRBS. Os valores de especificações que apresentaram melhor ajuste aos dados foram apresentados no tópico de testes dinâmicos. A entrada e saída do processo para estimação são mostradas graficamente, na Figura 38. Onde $u1$ corresponde a Carga térmica do Refervedor, e $y1$ a Temperatura do Refervedor. Na Figura 39, janela do ident, se vê todos os modelos propostos.

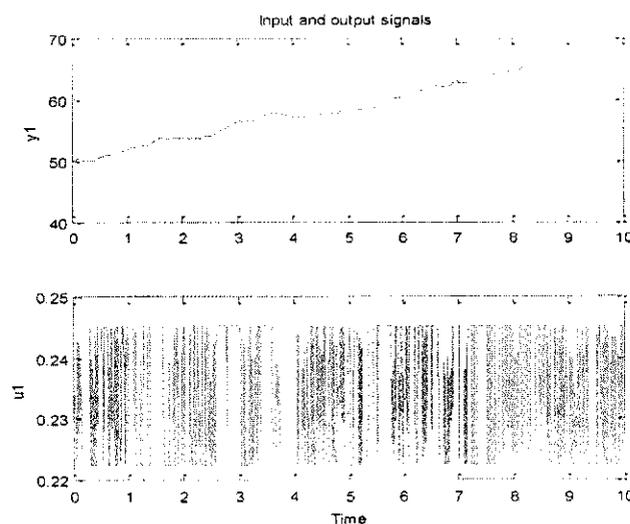


Figura 38 - Dados de Entrada (Carga térmica do Refervedor)-Saída (Temp. do Refervedor) do Processo, correspondentes às mudanças no set point da vazão de alimentação provocadas pelo elemento PRBS.

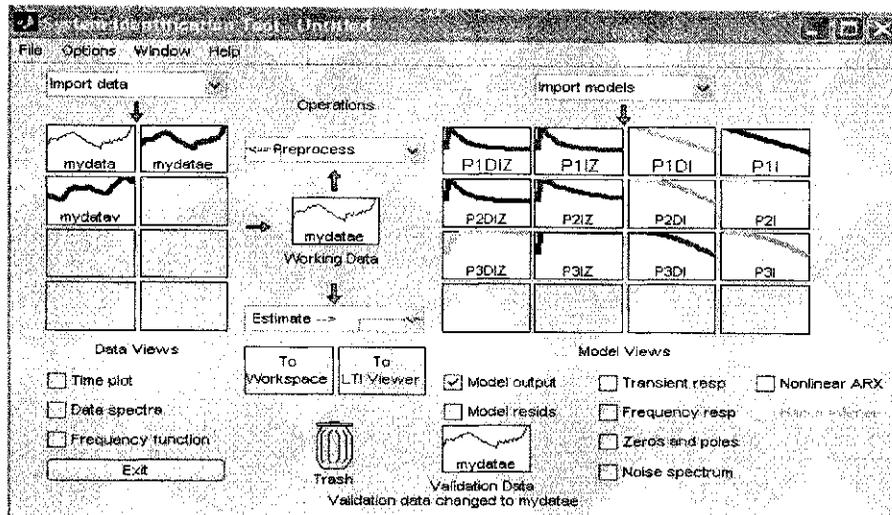


Figura 39 - Modelos matemáticos obtidos pela ferramenta Ident para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Vazão de Cloro Gás

Temos todos os modelos simulados no Ident, um sobreposto aos outros, Figura 40.

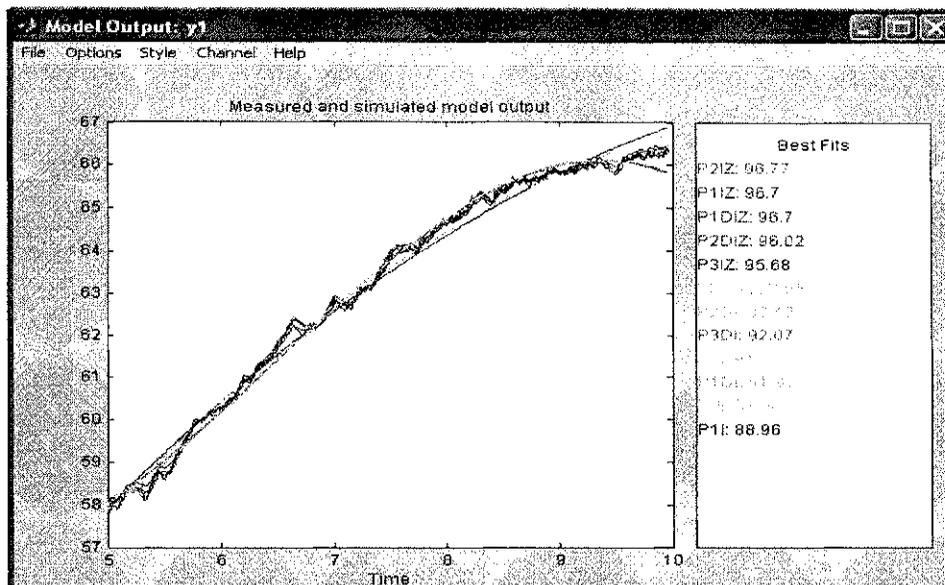


Figura 40 - Resposta de todos os modelos selecionados correspondentes a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor

Como pode ser visto o modelo P2IZ dentre os validados apresenta o melhor fator de correlação, isso não confirma que ele seja o melhor modelo a representar o perfil dos dados, logo é necessário uma análise sobre os parâmetros obtidos através dos modelos apresentados, analisando assim, o ganho, as constantes de tempo, e assim confirmar o que melhor se ajusta aos dados. O modelo Função de Transferência (FT) contendo um pólo, tempo morto, zero e comportamento integrador, foi o que melhor representou a planta (P1DIZ), conforme é mostrado na Figura 41.

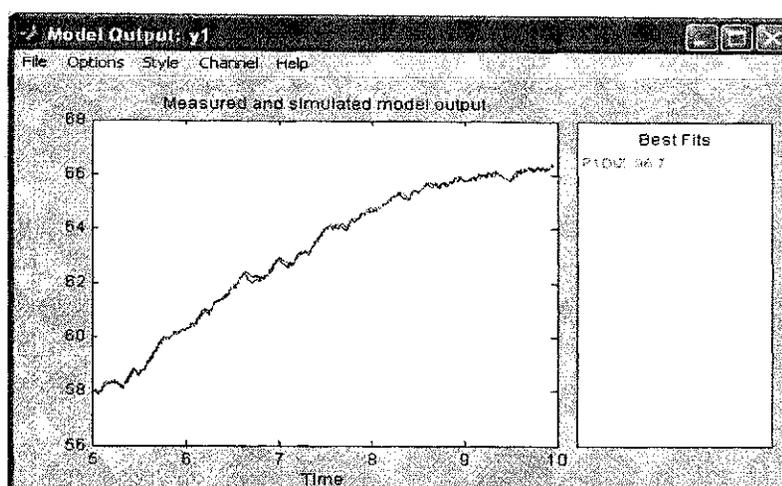


Figura 41 – Resposta ao modelo escolhido para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor

As demais variáveis em estudo, são apresentadas logo em seguida, juntamente com suas respectivas FT's. O Nível do Refervedor obteve como modelo uma FT de 1ª ordem contendo pólo, zero e comportamento Integrador. A Pressão do Refervedor apresenta um modelo do tipo ARX 550 como melhor ajustado aos dados. O Nível do 8º estágio do Pré-Resfriador obteve como modelo, uma FT de 2ª ordem contendo pólos, zero e comportamento Integrador. A Temperatura do 1º e 2º estágio, apresentam cada, uma FT de 1ª ordem, com zero, pólo e comportamento Integrador. O Nível do Inter-Resfriador possui como modelo, uma FT de 2ª ordem, contendo pólos, zero e comportamento Integrador. A Pressão do Inter-Resfriador Possui uma FT de 2ª ordem, contendo pólos, zero e comportamento Integrador. Todos os modelos matemáticos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Representações matemáticas correspondentes as Variáveis do Processo

Variáveis do Processo	Modelos Matemáticos (FT e ARX)
Temperatura do Refervedor	$G(s) = 7.2545 \frac{(1 + 206.82s)}{s(1 + 4.5687s)}$
Nível do Refervedor	$G(s) = -2.802 \times 10^{-2} \frac{(1 + 360.43s)}{s(1 + 8.2293s)}$
Pressão do Inter Resfriador	$G(s) = -2.4659 \times 10^{-5} \frac{(-358.05s + 1)}{(1 + 0.001s)(0.019556s + 1)}$
Nível do Inter Resfriador	$G(s) = 0.0010315 \frac{(-13.063s + 1)}{(1 + 1.4923s)(1.4888s + 1)}$

Nível do 8º estágio do Compressor	$G(s) = -7.9022 \times 10^{-3} \frac{(-355.59s + 1)}{(1 + 2.1288s)(0.001s + 1)}$
Temperatura do 1º estágio do Compressor	$G(s) = 0.002443 \frac{(1 - 210.19s)}{s(1 + 0.029231s)}$
Temperatura do 2º estágio do Compressor	$G(s) = 0.0057598 \frac{(1 - 68.995s)}{s(1 + 0.034336s)}$
Pressão do Refervedor	$(1 - 0.6322 q^{-1} - 0.3892 q^{-2} - 0.2938 q^{-3} + 0.1673 q^{-4} + 0.148 q^{-5}) \times y(t) =$ $(0.164 - 0.005772 q^{-1} - 0.06956 q^{-2} - 0.07786 q^{-3} - 0.009397 q^{-4}) \times u(t) + e$

As variáveis que necessitaram de controle, após uma perturbação na Carga térmica do Refervedor foram: Temperatura do Refervedor, Nível do 8º estágio do Compressor, Nível do Refervedor e Nível do Inter-Resfriador.

c) Vazão de Cloro Líquido total para o Pré-resfriador

O sinal de excitação utilizado para esta variável também foi o PRBS. A entrada e saída do processo para estimação são mostradas graficamente, na Figura 42. Onde u_1 corresponde a Vazão de Cloro Líquido, e y_1 a Temperatura do Refervedor.

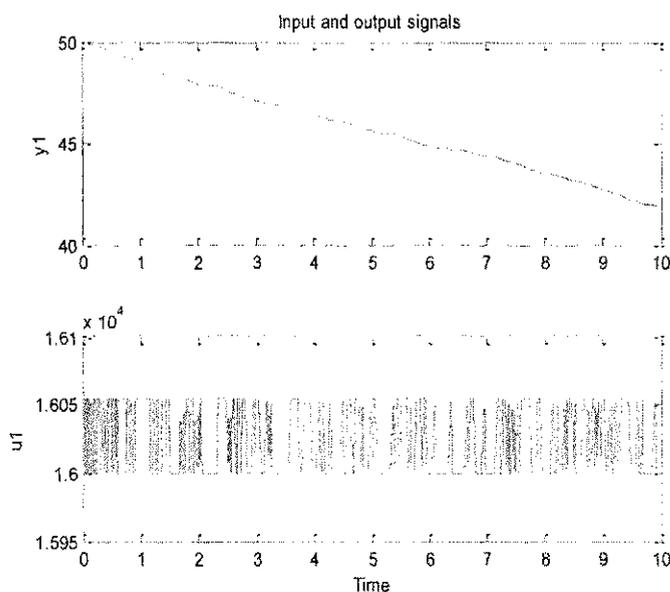


Figura 42 - Dados de Entrada (Vazão de Cloro líquido total) –Saída (Temp. do Refervedor) do Processo, correspondentes às mudanças no set point da vazão de alimentação provocadas pelo elemento PRBS. Na Figura 43, na janela do Ident, se vê todos os modelos propostos.

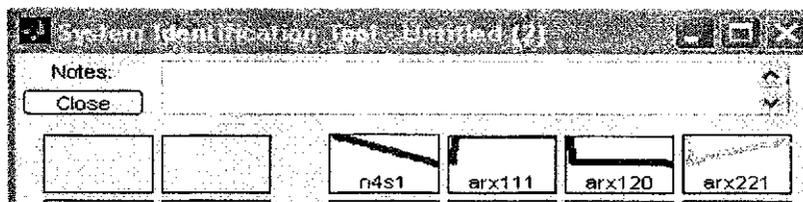
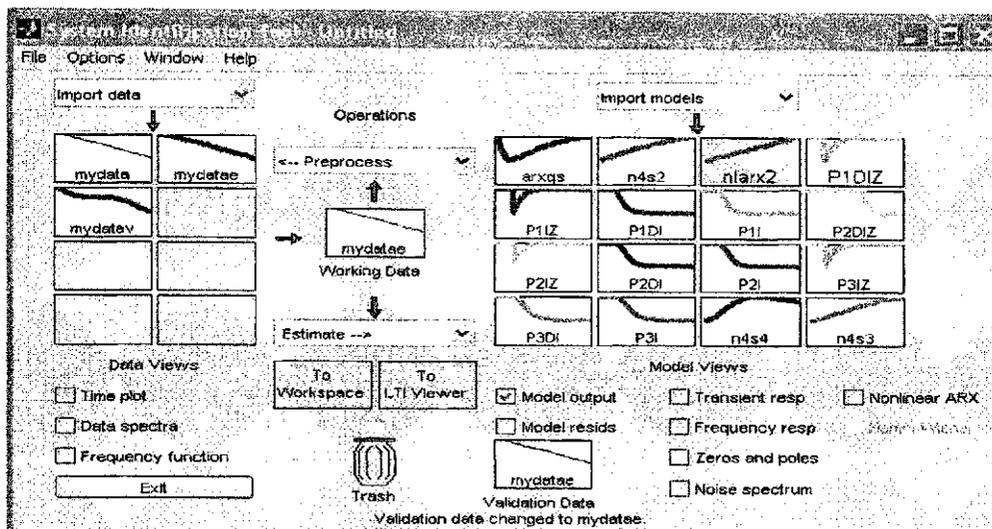


Figura 43 - Modelos matemáticos obtidos pela ferramenta Ident para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor

Abaixo na Figura 44 são apresentados todos os modelos seleccionados para ajuste dos dados.

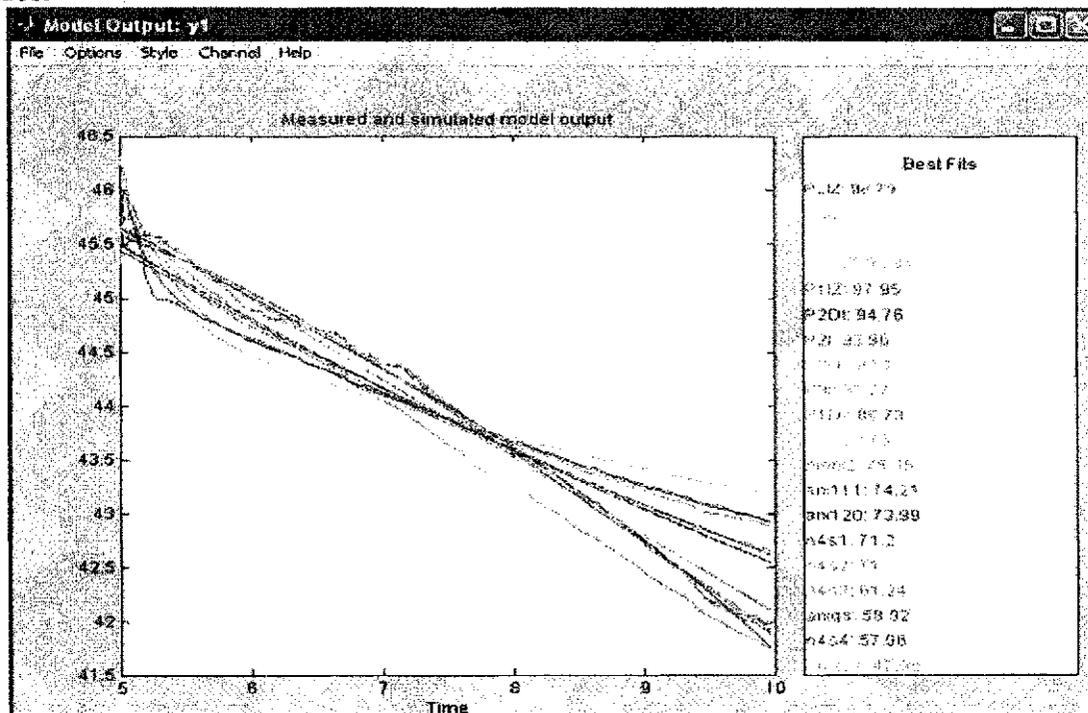


Figura 44 - Resposta de todos os modelos seleccionados correspondentes a temperatura do Refervedor sob uma perturbação na Carga térmica do Refervedor

O modelo FT de 2ª ordem contendo pólos, tempo morto, zero e comportamento Integrador, foi o que melhor representou a planta, conforme é mostrado na Figura 45.

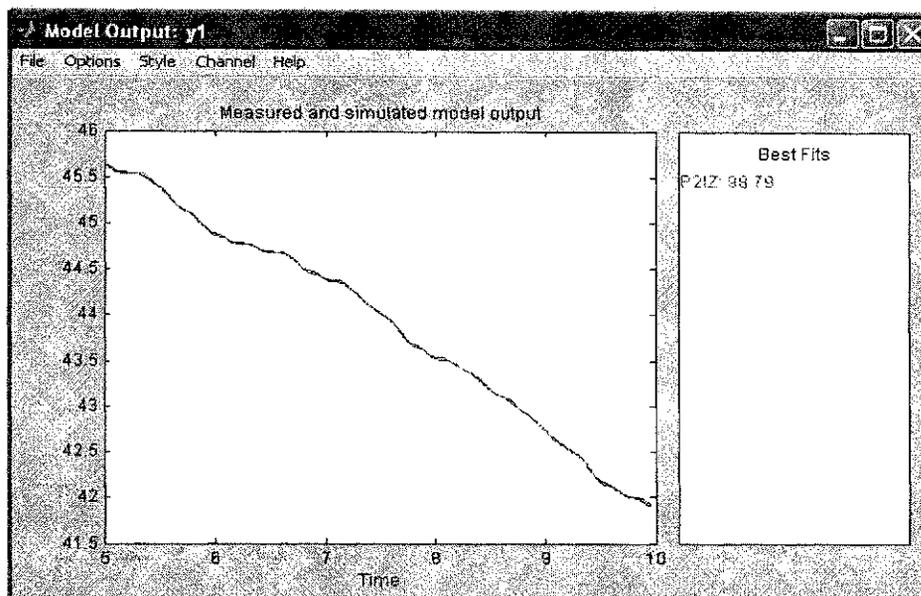


Figura 45 – Resposta ao modelo escolhido para a temperatura do Refervedor a uma perturbação na Carga térmica do Refervedor

Para o Nível do Refervedor foi obtido como modelo uma FT de 1ª ordem contendo pólo, zero e comportamento Integrador. O Nível do Inter-Resfriador obteve como modelo uma FT de 3ª ordem contendo pólo, zero e comportamento Integrador. O Nível do 8º estágio do Pré-Resfriador apresenta uma FT de 3ª ordem, contendo pólos, zero e comportamento Integrador.

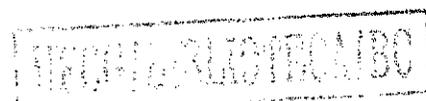
A Temperatura do 1º estágio do Compressor apresenta uma FT de 2ª ordem, com zero, pólos e comportamento Integrador. A Temperatura do 2º estágio do Compressor apresenta como modelo validado uma Arx550. Em termos de FT, pode ser visto na Tabela 9 abaixo.

A Pressão do Inter-Resfriador apresentou uma FT de 3ª ordem, contendo pólos, zero e tempo morto, além de possuir comportamento Integrador. A Pressão do Refervedor possui como modelo válido para os dados, uma FT de 2ª ordem, contendo pólos e zero, assim como, um comportamento Integrador.

Tabela 9 – Representações matemáticas correspondentes as Variáveis do Processo

Variáveis do Processo	Função de Transferência (FT)
Temperatura do Refervedor	$G(s) = -5.302 \times 10^{-5} \frac{(2987s + 1)}{s(1 + 0.004472s)(1 + 5.2907s)}$
Nível do Refervedor	$G(s) = 2.2111 \times 10^{-7} \frac{(4153.7s + 1)}{s(1 + 8.6155s)}$
Pressão do Inter Resfriador	$G(s) = -2.7473 \times 10^{-10} \frac{(-3669.8s + 1) \exp(-7.0272 \times 10^3 s)}{s(1 + 0.001s)(1 + 0.029059s)(1 + 0.065382s)}$
Nível do Inter Resfriador	$G(s) = 8.4705 \times 10^{-7} \frac{(2824.2s + 1)}{s(1 + 4.8806s)(1 + 0.001s)(1 + 0.001s)}$
Nível do 8º estágio do Compressor	$G(s) = 3.3848 \times 10^{-4} \frac{(-10003s + 1)}{(1 + 0.001s)(0.001s + 1)(1 + 0.038243s)}$
Temperatura do 1º estágio do Compressor	$G(s) = -7.0173 \times 10^{-9} \frac{(757s + 1)}{s(1 + 0.0618s)(1 + 0.016s)}$
Temperatura do 2º estágio do Compressor	$(1 - 0.469q^{-1} - 0.352q^{-2} - 0.1219q^{-3} - 0.07604q^{-4} + 0.0183q^{-5}) \times y(t) = (-2.785e^{-5} + 5.257e^{-6}q^{-1} + 7.208e^{-6}q^{-2} + 5.017e^{-6}q^{-3} + 5.974e^{-6}q^{-4}) \times u(t) + e(t)$
Pressão do Refervedor	$G(s) = 3.1764 \times 10^{-8} \frac{(1429.5s + 1)}{s(1 + 0.050101s)(1 + 0.001s)}$

As variáveis que necessitaram de controle, após uma perturbação na Vazão de Cloro Líquido foram: Temperatura do Refervedor, Nível do 8º estágio do Compressor e Nível do Refervedor.



CAPÍTULO 5 – IMPLEMENTAÇÃO DA ESTRUTURA DE CONTROLE

Este capítulo apresenta uma suscinta abordagem sobre Controle de Processos, Implementação de Controladores PID, assim como, a Implementação do Sistema de Controle no ambiente Simulink/Matlab, onde esta corresponde a apenas uma parte da malha que compõe a completa estratégia de controle do sistema, sendo utilizada para justificar parte do comportamento existente na planta.

5.1 Controle de Processos

Controle de processos é a técnica de manter variáveis de um processo em valores pré-determinados, conhecidos como set-point's. Os sistemas para controle de processos são uma combinação de componentes que atuam em conjunto e são desenvolvidos de forma a maximizar a produção e minimizar seus custos, além de eliminar possíveis riscos envolvidos na produção. Tarefas que antes implicavam em alto risco para operadores de equipamentos podem ser realizadas remotamente sem qualquer risco. Em um sistema de malha aberta, a ação de controle independe da saída. Já em um sistema de malha fechada, a ação de controle é dependente da saída, Como pode ser visto na Figura 46.

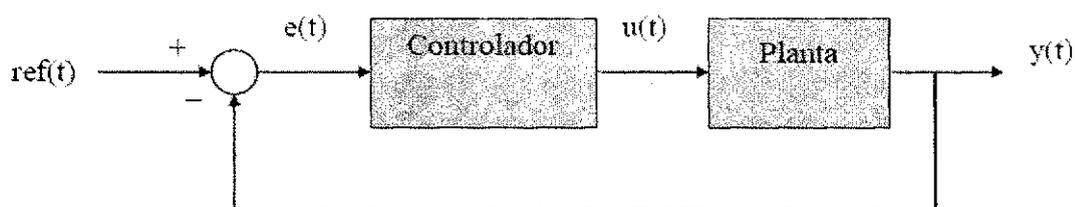


Figura 46 – Sistema de Controle em malha-fechada

Sendo: Planta (processo): Sistema físico a ser controlado;

Controlador: Elemento responsável pela excitação da planta.

Onde defini-se os seguintes sinais:

Ref(t): Sinal de referência;

e(t): Sinal de erro;

u(t): Sinal de controle;

$y(t)$: Sinal de saída.

Realimentação é a informação que um sistema de malha fechada usa para controlar a saída. No esquema mostrado acima através da Figura 46, pode ser compreendido que o valor real da saída é subtraído do valor desejado. Essa diferença é o sinal de erro, que o sistema usa para ajustar a saída ao valor desejado.

Na maior parte das aplicações, um sistema de controle é composto de:

- a) Um medidor que reage às variações das variáveis controladas;
- b) Um controlador, que reage ao desvio entre um valor medido e o ponto de ajuste, produzindo uma saída;
- c) Um elemento final de controle, geralmente uma válvula que é acionada pela saída do controlador, e que faz variar uma variável manipulada.

5.2 Implementação de Controladores PID

A função de transferência do controlador PID é apresentada da seguinte forma:

$$PID(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (6)$$

Considerando o diagrama de blocos apresentado na Figura 45, admitindo que no bloco relativo ao controle tem-se um controlador PID. A variável $e(t)$, representa o erro de rastreamento ou, a diferença entre a entrada de referência e a variável de saída do sistema. Este sinal de erro será a variável de entrada do controlador PID, que tratará de calcular a sua derivada e a sua integral. O sinal de saída do controlador, $u(t)$, será igual à magnitude do erro multiplicada pelo ganho proporcional (K_p) mais, o ganho integral (K_i) multiplicado pela integral do erro e mais o ganho derivativo (K_d) multiplicado pela derivada do erro.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

Em linhas gerais pode-se dizer que o sinal de controle $u(t)$ será aplicado à planta, implicando um novo valor para variável de saída $y(t)$. Este novo valor será imediatamente comparado com o sinal de referência ocasionando um novo sinal de erro $e(t)$. O controlador processa este novo sinal erro que, por sua vez, gera um novo sinal de controle alterando o

valor da saída. O controle proporcional (K_p) é o mais simples e evidente, em casos mais complexos não é eficiente. Este controle é proporcional ao desvio existente no sistema. Em relação a esse tipo de controle, um aspecto importante deve ser levado em consideração, é a chamada Sobre elevação – máximo desvio a que esta sujeita a variável controlada, quando de uma eventual instabilidade. Como pode ser visto na Figura 47.

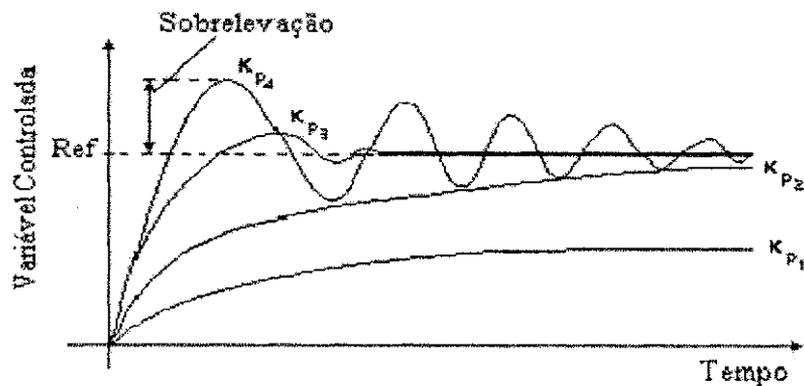


Figura 47 – Efeito do controle proporcional após uma perturbação

Como pode ser visto, à medida que se aumenta o ganho, conseqüentemente, a um aumento na instabilidade do sistema, da mesma forma, quando o ganho diminui nunca é alcançado o valor de referência. No entanto, no projeto de controle é necessário que haja atenção para encontrar o valor que melhor se adéqüe a esse parâmetro. Buscando uma menor instabilidade e uma melhor aproximação ao valor do set point desejado.

Há sistemas que podem ser controlados por efeito proporcional, exceto se o ganho for muito baixo, o que determina grande margem de erro e tempo elevado para que o valor alcance a referência. A forma de eliminar esses problemas consiste no uso das outras parcelas PID, que estabilizam o sistema, tornando-o rápido e preciso.

Sobre o controle integrativo, o mesmo é encarado da mesma forma que o proporcional, porém nesse caso a proporcionalidade é a integral do erro ou desvio entre acumulações do valor de uma determinada função entre dois limites pré-fixados. Portanto, esse tipo de parcela de controle é muito eficiente na estabilização e também na eliminação do erro de posição que havia no caso de controle puramente proporcional.

Devido à condição de acumulação de todos os erros anteriores, essa parcela de controle exerce um papel de filtro, pois evita alterações quando a variável controlada está próxima de seu valor de referência. O controle integrativo interfere de maneira a propiciar

os efeitos de instabilidade, mas, quando o valor está próximo da referência, a atuação do controle passa a ser evidenciada em relação as outras parcelas.

A ação derivativa é proporcional a derivada do erro existente entre a variável controlada e a de referência. A derivada do erro representa em termos gerais a velocidade de crescimento do mesmo, ou em caso de valores negativos, a sua taxa de queda. É importante saber ainda, que esta ação nunca pode estar sozinha, pois só causa efeitos durante as variações ou transitórios. (Pinto, 2000)

Em resumo, o quadro abaixo mostra os efeitos na resposta, do sistema em cadeia fechada, de adicionar os modelos proporcional, integral e derivativo.

Resposta CF	Tempo de Subida	Sobreelevação	Tempo de Estabelecimento	Erro Estacionário
Proporcional	Diminuição	Aumento	Sem alteração	Diminuição
Integral	Diminuição	Aumento	Aumento	Elimina
Derivativo	Sem alteração	Diminuição	Diminuição	Sem alteração

5.3 Implementação do sistema de controle no Simulink/Matlab

O sistema de controle foi implementado no ambiente Simulink/Matlab, com o intuito de sintonizar a malha de controle a partir dos modelos matemáticos encontrados através dos testes realizados na simulação do modelo da planta de produção de Cl_2 . A Figura 48 apresenta a estrutura da malha, onde o controle Feedforward foi definido como sendo uma relação entre as FT do distúrbio (Vazão de cloro Gás) e das variáveis manipuladas (Vazão de Cloro líquido) e (Carga térmica) atuando na temperatura do refervedor e dos distúrbios (Vazão de cloro Gás) e (Vazão de Cloro líquido), e da variável manipulada (Carga térmica) atuando na Temperatura do 1º estágio do Compressor.

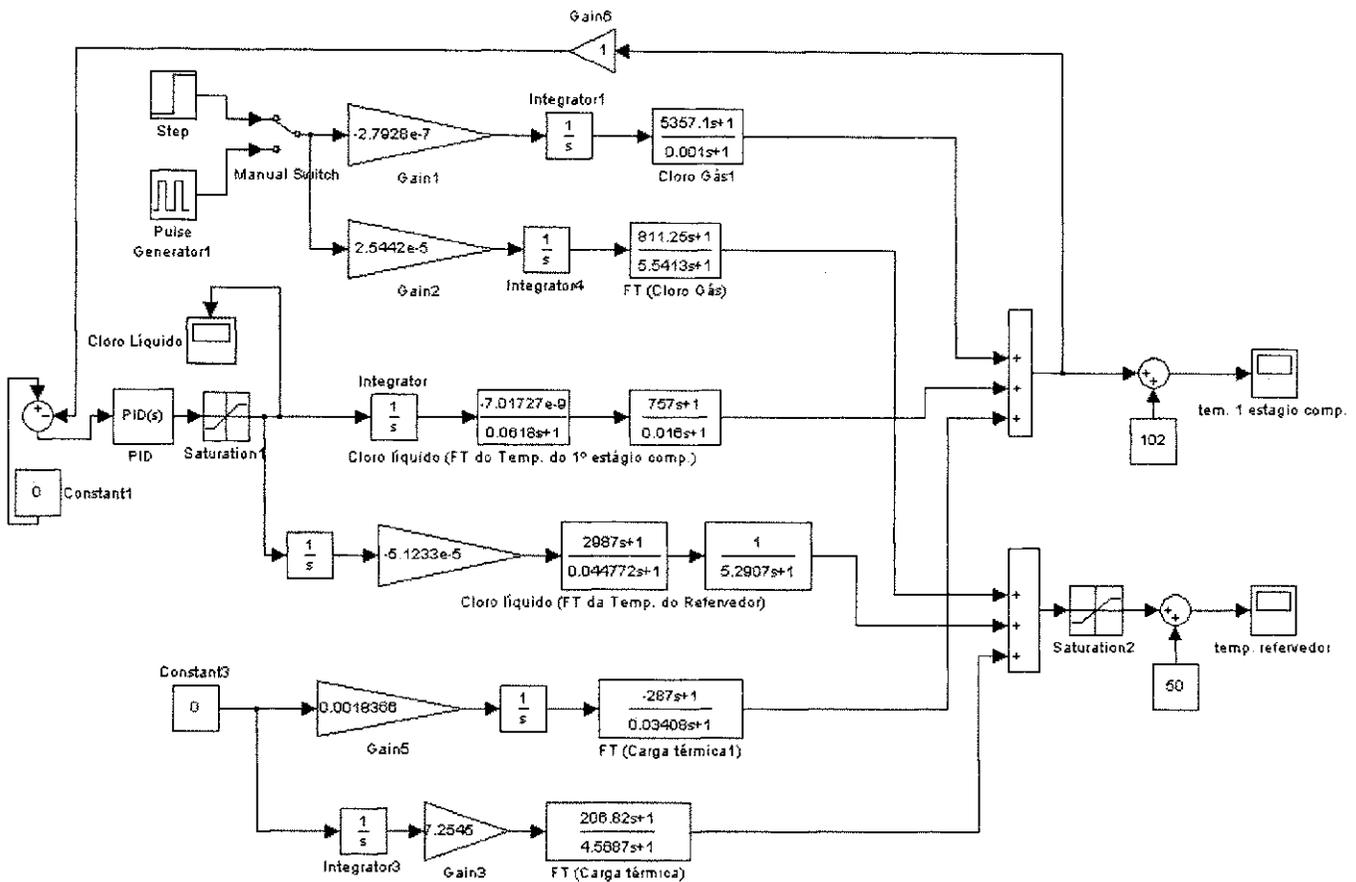


Figura 48 – Malha de controle no Simulink/Matlab

Os parâmetros do controlador foram sintonizados seguindo alguns passos mostrados a seguir, segundo a Versão 7.9 do Matlab.

Inicialmente, o controlador PID foi aberto, e declarado os valores como mostrado a diante.

Controller settings	
Controller form:	Parallel
Proportional (P):	1
Integral (I):	1
Derivative (D):	0

Ele toma como base esses valores para iniciar a sintonia do controlador. Quando o PID Tuner lança, o software calcula um modelo de planta linearizada visto pelo controlador. O sintonizador PID calcula um controlador PI inicial para alcançar um equilíbrio razoável entre desempenho e robustez.

A Figura 49 a seguir, mostra o PID Tuner diálogo com o projeto inicial:

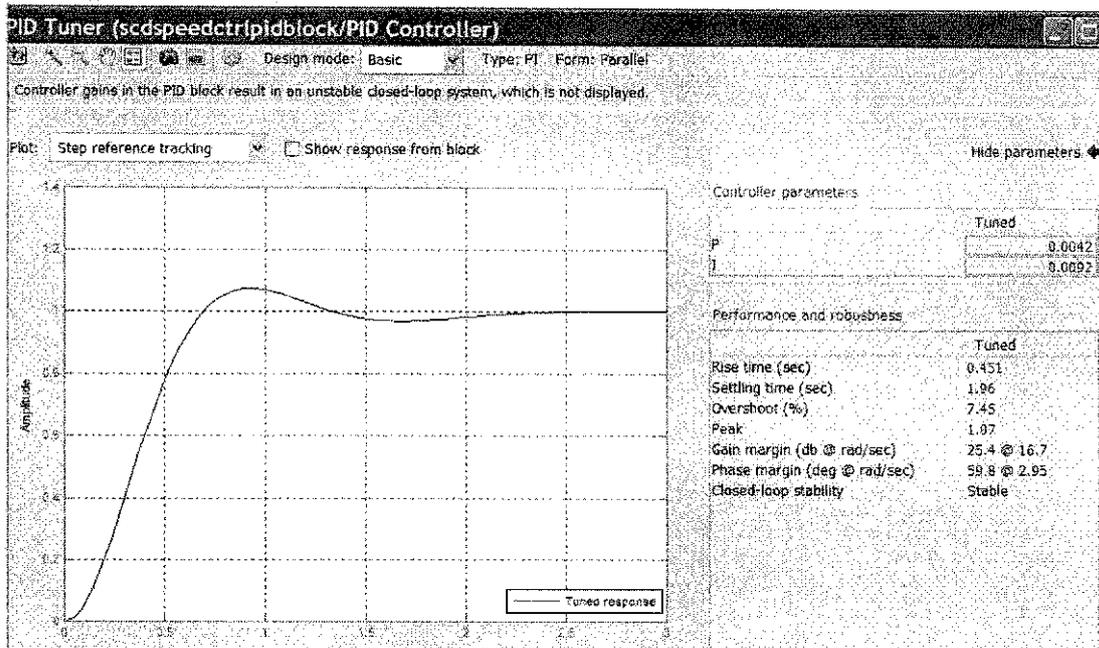
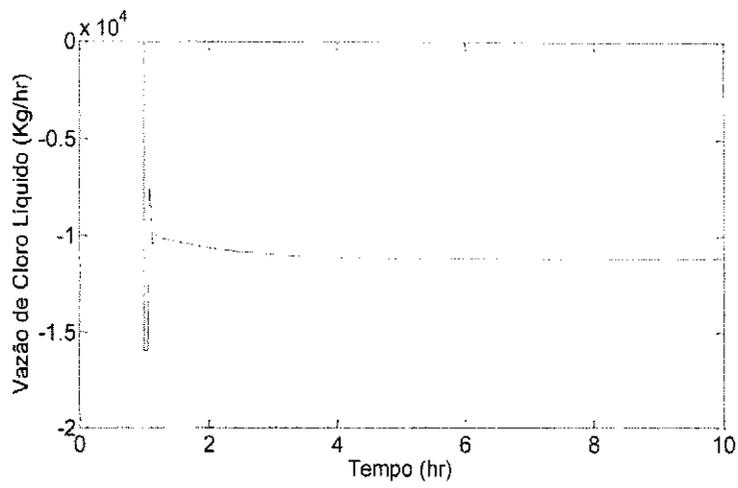


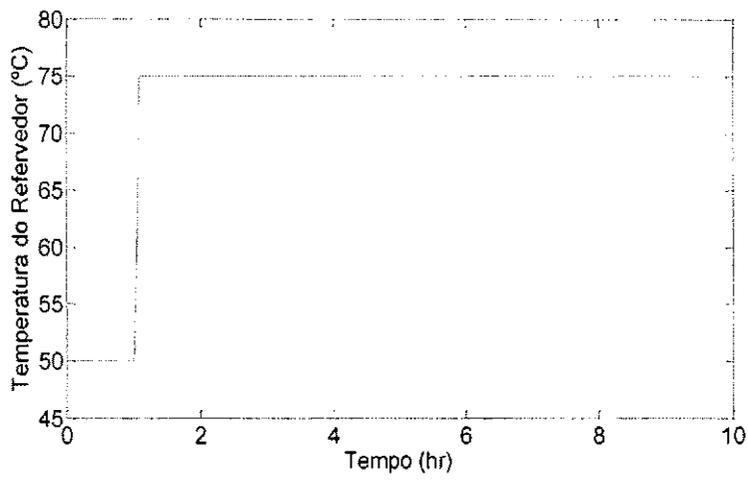
Figura 49 – Resposta do controle ao Projeto inicial

Pode ser observado os novos valores do controlador que foram calculados na tentativa de sintonia. Para este caso, os novos parâmetros encontrados são aplicados através da opção 'apply', e então, a malha é novamente simulada, para que estes parâmetros ajustem o controle da malha. Esse período de sobrelevação também pode ser diminuído variando o tempo de estabilização, ou a frequência, ambas opções contidas na própria janela mostrada acima.

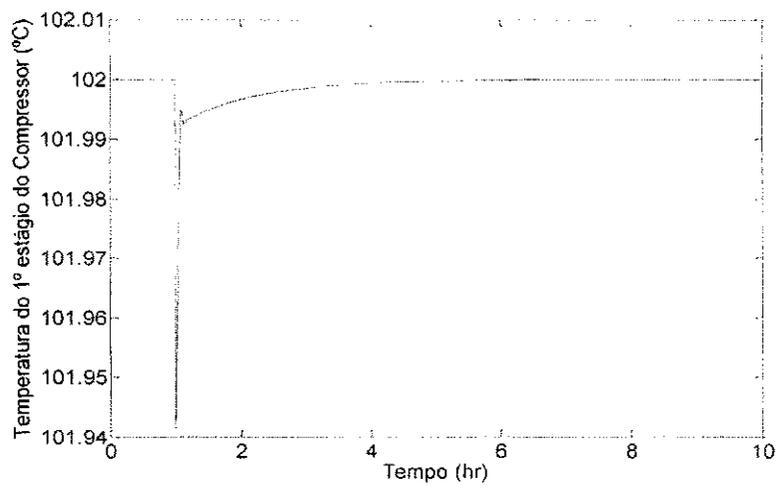
Na Figura 50, é possível verificar e entender o comportamento que a Vazão de Cloro Líquido, que funciona como Distúrbio sobre a Temperatura do 1º estágio do Compressor, obtém ao tentar controlar essa Temperatura. Assim como é mostrado o comportamento da Temperatura do 1º estágio do Compressor e da Temperatura do Refervedor.



(a)



(b)



(c)

Figura 50 – Comportamento da Vazão de Cloro Líquido (a), Temperatura do Refervedor (b) e Temperatura do 1º estágio (c)

Assim como pode ser observado acima, na Figura 50, a Temperatura do 1º estágio do Compressor pouca variação sofre ao ser perturbada na malha, atingindo rapidamente o seu controle, na faixa de referência (Set point). Porém a tentativa desse controle faz com que a Temperatura do Refervedor sofra elevada alteração, e atingirá rapidamente a saturação, assumindo altos valores, fazendo com que o CHCl_3 seja totalmente evaporado, e o equipamento atinja o esvaziamento. O que ocasiona sérios problemas ao funcionamento da planta.

Além disso, pode ser observado que a quantidade de Cloro Líquido que entra no Pre-Resfriador sofre uma enorme diminuição, isso fará com que grande parte ou todo o Cloro gás saia pelo topo da coluna, e não permitirá que o contaminante (NCl_3) provindo das células eletrolíticas chegue ao Refervedor, onde acontece a degradação. E comprometerá todo o funcionamento da planta, causando riscos de explosão, e outros problemas.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as conclusões que foram obtidas durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho. As conclusões são apresentadas na seqüência lógica em que foram obtidas durante cada etapa do desenvolvimento do trabalho, desde os testes realizados em malha aberta da planta, até a implementação da estrutura de controle no Simulink do software Matlab. Levando em consideração os resultados obtidos ao final, alguns comentários finais são feitos.

O trabalho tem como finalidade minimizar os distúrbios existentes na Unidade de Cloro-Soda da *Braskem* Maceió, em especial na seção de Compressão do Cloro. As variáveis consideradas como variáveis de processo foram: a temperatura do refeedor de clorofórmio, pressão do Refeedor e do Inter-Resfriador, níveis do Refeedor e Inter-Resfriador, assim como o nível do 8º estágio do Pré-Resfriador. As quais podem causar riscos no funcionamento da planta, dependendo da sua faixa de atuação.

Testes em malha aberta foram realizados com o intuito de entender e tirar conclusões sobre o comportamento transiente das variáveis em estudo. Através dos testes, foi observado que a temperatura do refeedor sobre uma grande dependência da Vazão de Cloro Gás, da Vazão de Cloro Líquido Total que entra no Pré-Resfriador, assim como da Carga térmica presente no Refeedor, ao perturbar as mesmas durante o processo. Sabendo que a temperatura do refeedor é um fator crítico para a degradação da Tricloroamina, logo, o seu controle é de fundamental importância.

Foi necessária também, a adição de controladores em outras variáveis do processo, tais como: níveis do Refeedor e Inter-Resfriador, Pressão do Refeedor e Inter-Resfriador, assim como o nível do 8º estágio do Pré-Resfriador.

Com relação às temperaturas de descarga nos estágios do compressor, nenhuma mudança significativa foi observada, após a aplicação de perturbações na planta. Ambas se estabeleceram dentro da faixa de operação permitida. Ou seja, não há necessidade de um controle para as mesmas.

Os melhores modelos obtidos na Identificação do Sistema para o distúrbio e o processo foram do tipo FT, ARX e Espaço de Estados. Ressaltando que o modelo FT dentre estes foi o melhor, para maior parte dos casos.

Ambos os modelos obtidos através da perturbação na Vazão de Cloro Gás possuíram características de comportamento Integrador. As FTs apresentaram baixas constantes de tempo de atraso, o que comprova a dinâmica rápida apresentados pelas mesmas após as perturbações. A perturbação na Vazão de Cloro Líquido total gera modelos do tipo FT, com comportamento Integrador, e sem tempo morto em todas as variáveis estudadas para o controle. Possuindo pequenos valores para o ganho. A Carga térmica do Refervedor ao ser perturbada, apresenta modelos com comportamento Integrador. E neste caso os valores de ganho foram maiores quando comparados aos casos mostrados anteriormente. O que mostra que a resposta obtida ao perturbar essa variável obteve uma taxa maior do que a taxa de desvio aplicada quando comparada, em um pequeno espaço de tempo.

Apenas uma parte da planta de controle foi proposta no trabalho. Já o restante que completa o sistema será implementado em trabalhos futuros, como será apresentado mais adiante. A malha de controle mostrada nesse trabalho foi proposta com o intuito de mostrar que não há necessidade de controlar a Temperatura do 1º estágio do Compressor, visto que a mesma praticamente não sofre variação aos distúrbios provocados na planta, como verificado nos próprios testes da planta, além disso, se este controle for adicionado na planta, ocasionará outros vários problemas como verificado anteriormente.

CAPÍTULO 7 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Desenvolvimento da estratégia completa de controle a partir da Identificação do Sistema presente nesse trabalho;
- ✓ Implementação desse sistema de controle no modelo da planta da seção de Compressão do Cloro da Unidade de Cloro-Soda da *Braskem* Maceió, localizado no ambiente Aspen Dynamics™;
- ✓ Análise da composição da Tricloramina e Clorofórmio, ao final do processo. Concluindo assim se o sistema de controle proposto é satisfatório;
- ✓ Estabelecer outra estratégia de controle, tomando outras variáveis como distúrbio e manipuladas;

CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, Luis Antonio. Introdução à Identificação de Sistemas. Editora UFMG, 3ª edição, Belo Horizonte (2007).

ASSIS, A. J. de., Identificação e controle de processos não-lineares utilizando redes neurais artificiais, 2001. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.

BRITO, Karoline Dantas. Avaliação do comportamento dinâmico de uma unidade de compressão de cloro, 2009. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande.

DOKTER, T. Fire and Explosion Hazards of Chlorine-Containing, *Journal of Hazardous Materials* (1985), 10, 73-87.

ENVIRONMENT C., HEALTH C. (2001) *Canadian Environmental Protection Act, 1999*. Priority Substances List assessment report. Chloroform. Ottawa, Ontario, Minister of Public Works and Government Services Canada.

GERRAT, C. Recent Developments in Chlorine, Document KREBS SWISS presented at TECHNOGERMA (2002).

GEST 76/55. Maximum Levels of Nitrogen Trichloride in Liquid Chlorine, Euro Chlor Publications, (2001).

GUERRA, Fábio Alessandro. Análise de métodos de agrupamento para o treinamento de redes neurais de base radial aplicadas à identificação de sistemas, 2006. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

GUSTIN, J. L. (2002). Influence of Trace Impurities on Chemical Reaction Hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* , 37-48.

GUSTIN, J. L. (2005). Safety of Chlorine Production and Chlorination Processes. *Chemical Health Safety* , 5-16.

LENP, L. d.-U. (2004). Eliminação de Tricloroamina no Processo de Produção de Cloro – Substituição do Tetracloroeto de Carbono pelo Clorofórmio. Proposta de Consultoria, Campina Grande - 882.

MARUYAMA, N.; O papel dos Pólos e Zeros. Departamento de Engenharia Mecatrônica – EPUSP. São Paulo, 2007.

PINTO, L. A. V.; Sistema de Controle. Re compilado a partir de originais publicados pela Revista Nova Eletrônica da Editora Editele. 2000.

ROCHA, F. L., Identificação de sistemas não-lineares multivariáveis usando redes neurais perceptron multicamadas e função de base radial, 2006. Dissertação (mestrado)- Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

SILVA, D. H., Protocolos de Montreal e Kyoto: pontos em comum e diferenças fundamentais - Revista Brasileira de Política Internacional. vol.52, nº.2, Brasília July/Dec. 2009.

TAVARES, J. I. (2006). Industrial and Simulation Analysis of Nitrogen Trichloride Decomposition Process in Eletrolytic Chlorine Production. *Journal of Harzards Materials*.

VOGLER, C. E. Chemistry of the Nitrogen Trichloride – A Review of the Literature, Eighth Meeting of Chlorine Plant Managers (1963).

WALLÉN, A., A Tool For Rapid System Identification, 1999. Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology - Lund, Sweden.

ANEXO

- **Artigo apresentado e publicado nos anais do XVIII COBEQ / 2010 – Foz do Iguaçu - PR**