

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**Desenvolvimento de Estratégias de Controle
para uma Unidade Desmetanizadora**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Leandro Porto Lusa

Porto Alegre

2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Desenvolvimento de Estratégias de Controle para uma Unidade Desmetanizadora

Leandro Porto Lusa

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Controle de Processos

Orientador:

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler

Co-orientador:

Prof. Dr. Argimiro Resende Secchi

Porto Alegre

2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Desenvolvimento de Estratégias de Controle para uma Unidade Desmetanizadora*, elaborada por Leandro Porto Lusa, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Carlos E. Pereira

Prof. Dr. Darci Odloak

Prof. Dr. Maurício B. de Souza Jr.

Esta dissertação de mestrado foi escrita
com a esperança de quem planta uma árvore
e com a paixão de quem faz um filho

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador Prof. Jorge Trierweiler, devido ao acompanhamento sistemático do trabalho desenvolvido, e ao Prof. Argimiro Secchi pela co-orientação, também fundamental para o sucesso desta tese.

Devo agradecer à COPENE, nas pessoas do Eng^o. Paulo Freitas e Eng^o. João Farah, pelo suporte financeiro, pelo suporte técnico e pela aposta na produção científica nacional.

Agradeço também a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Departamento de Engenharia Química pela excelente infra-estrutura disponibilizada e pelos recursos humanos altamente capacitados que foram responsáveis pela minha formação.

Agradeço a todo o grupo do mestrado que tornou o aprendizado uma tarefa solidária e muito agradável, de modo especial ao sempre atencioso e colega Luciano Farina, ao gaúcho de alma Christian Barg, ao sempre alegre Maurício Posser e a parceirona Simone Marcon. Agradeço ainda a todo o pessoal do grupo de simulação e controle e a todo os funcionários e professores do DEQUI.

Agradeço também à minha família, sempre presente na arquibancada e jogando junto quando necessário. De modo especial dedico este trabalho aos meus pais Jacir e Sirley, à minha irmã Débora e ao meu irmãozinho Ique.

Agradeço também de maneira muito carinhosa a Ju Paxa, pelo amor e pela amizade dedicada. Também quero agradecer a todos os meus amigos e amigas, sempre presentes nas horas boas e ruins, e a todos que de uma maneira ou de outra sempre torceram pelo sucesso deste trabalho.

Resumo

Esta dissertação envolve o estudo de uma unidade desmetanizadora que apresenta problemas de inundação em uma de suas colunas de fracionamento limitando a carga da unidade num patamar abaixo do desejado. Foram implantados então, alinhamentos alternativos que melhoraram a situação hidráulica da planta, permitindo o aumento da carga processada, porém às custas do aumento das perdas do processo.

A planta estudada caracteriza-se pela elevada integração energética e pelo grande número de ciclos, que dificultam o seu entendimento. Em uma primeira etapa foram desenvolvidas simulações estáticas e dinâmicas, que em conjunto com análises de dados operacionais da planta, propiciaram uma maior compreensão da problemática da unidade. Constatou-se que a estrutura de controle atual está fazendo com que um aumento na carga da unidade sobrecarregue uma coluna de fracionamento em detrimento de outra, que acaba ficando subutilizada.

Foram propostas duas estruturas de controle alternativas objetivando distribuir melhor a carga entre as colunas. Com o auxílio da simulação dinâmica, foram comparados os desempenhos destas duas propostas com as situações de projeto e atual da planta, quanto à capacidade de produção e à situação hidráulica resultante. As estruturas propostas apresentaram um desempenho superior às configurações atual e de projeto da planta. Face a isto, uma das estruturas, que possui a vantagem de poder ser implementada sem a parada da unidade, foi aprimorada e constitui uma solução que pode ser utilizada imediatamente, propiciando que a planta tenha uma situação operacional mais estável e um aumento de produção.

Abstract

This dissertation analyzes a demethanizer unit that has flooding troubles in one of its distillation columns limiting, therefore, the production rate of the unit in a lower value than the required. Trying to solve this problem, two bypasses were implemented in the process, but they improved the hydraulic situation reducing the ethylene recovery.

The plant is high heat integrated and has several recycle streams, which make difficult to understand the process. In a first step, dynamic and steady state simulations were developed. With these models and the analysis of plant data it was possible to understand the origin of the problem and to understand how the bypasses work. It was concluded that current control structure is overloading one distillation column, while the other one operates at a lower production rate than possible.

Based on the better process understanding, two control structures were proposed. They can efficiently balance the feed distribution between the two main distillation columns. This better balance feed provides stable operation for the unit and increases the ethylene recovery. By dynamic simulations, the performances of the proposed control structures were compared with the current and project configurations. These simulations showed that the proposed control structures have a better performance than the current and project configurations. Thus, one of the proposed control structures, which can be implemented without shutdown the unit, was improved and constitute the solution to be applied shortly.

Sumário

Introdução	1
1.1 Enfoque do trabalho	2
1.2 Estrutura de dissertação.....	2
Descrição da Unidade	5
2.1 Localização e Objetivos da Unidade Desmetanizadora	5
2.2 Descrição da unidade.....	6
2.2.1 Obtenção de eteno produto.....	7
2.2.2 Recuperação de eteno.....	8
Entendendo a Problemática da Unidade	11
3.1 Efeito das Pressões	11
3.2 Caracterização do problema	13
3.3 Entendendo as origens dos problemas.....	13
3.3.1 Inundação da coluna T02	14
3.3.2 Papel desempenhado pelos desvios.....	16
Desvio 1.....	16
Desvio 2.....	16
3.3.3 Perda de Eteno.....	20
Situação da Coluna T01	20
Situação da Coluna T02	20
3.4 Soluções.....	22
3.4.1 Estrutura atual de controle.....	22
3.4.2 Proposta de estruturas de controle.....	24
Estrutura 1 – com alteração de alinhamento	24
Estrutura 2 – sem alteração de alinhamento.....	25
Simulação Estática e Modelagem Termodinâmica	27
4.1 Passos básicos da simulação estática.....	27
4.1.1 Seleção dos componentes.....	28
4.1.2 Modelagem Termodinâmica.....	28
4.1.3 Montagem do fluxograma de processo	29
4.1.4 Convergência da simulação do processo.....	29
4.1.5 Análise dos resultados e comparação com dados reais	30
4.2 Análise do Modelo Termodinâmico	30
4.2.1 Modelo Termodinâmico	31
4.2.2 Parâmetros Binários	32
4.2.3 Parâmetro Binário metano-eteno.....	34
4.2.4 Referências da Literatura.....	36
4.3 Comparação entre simulações estacionárias do Aspen Plus e do Hysys Process	37
Simulação Dinâmica da Unidade	43
5.1 Desenvolvimento da Simulação Dinâmica.....	43
5.1.1 Escolha do simulador	43

5.1.2	Simplificações realizadas.....	44
	Componentes envolvidos.....	44
	Simplificações no fluxograma.....	45
5.1.3	Considerações adicionais.....	46
5.2	Dados de planta x dados da simulação dinâmica.....	47
5.2.1	Comparação num estado estacionário da planta.....	47
5.2.2	Comparação durante transientes da planta.....	51
	Subida de carga da unidade e abertura do desvio 1.....	51
	Subida de carga da unidade e fechamento parcial do desvio 2.....	57
Hidráulica de colunas de pratos.....		61
6.1	Características básicas de uma coluna de pratos.....	61
6.2	Mecanismos de inundação de uma coluna de pratos.....	67
6.2.1	Inundação por arraste (jet flooding).....	68
6.2.2	Inundação no downcomer por choque (Downcomer choke flooding).....	71
	Critério de Glitsch.....	71
	Critérios de Koch e Nutter.....	72
6.2.3	Inundação no downcomer do tipo backup.....	73
	Perda de carga no downcomer (hda).....	74
	Altura de líquido no prato inferior (hc).....	74
	Altura referente à perda de carga no prato (ht).....	75
6.3	Análise de colunas reais quanto a inundação.....	77
Desempenho das estruturas de controle.....		83
7.1	Natureza da inundação.....	83
7.2	Desempenho das estruturas de controle.....	85
7.3	Aprimoramento da Estrutura 2.....	90
7.3.1	Papel desempenhado pelo desvio 1.....	90
7.3.2	Análise de diferentes configurações para a estrutura 2.....	92
	Atuando diretamente em R.....	92
	Estratégia final de controle utilizando uma malha interna.....	94
7.3.3	Potencial de ganho da estrutura 2.....	96
7.3.4	Desempenho da estrutura 2 em relação a distúrbios na composição da carga da unidade.....	97
Conclusões e sugestões.....		99
Referências bibliográficas.....		101

Lista de figuras

- Figura 2.1:** Localização da unidade desmetanizadora na planta petroquímica. Na figura metano MP representa a corrente de metano de média pressão, e metano AP se refere a corrente de metano de alta pressão..... 5
- Figura 2.2:** Representação em bloco da unidade desmetanizadora..... 6
- Figura 3.1:** Curvas de equilíbrio metano-eteno calculadas através do método de Peng-Robinson para os dois níveis de pressão da unidade..... 12
- Figura 3.2:** Percentagem vaporizada (base molar) vs. fração molar de etileno produzida por uma mistura líquida saturada de metano e etileno quando expandida isoentalpicamente de 32 para 16 kg/cm². O modelo de Peng-Robinson com entalpias calculadas pelo método de Lee-Kesler implementado no simulador Hysys Process foi utilizado na geração desse gráfico..... 12
- Figura 3.3:** Dados da tendência da planta durante uma subida de carga da unidade. .. 14
- Figura 3.4:** Localização dos desvios 1 e 2 na planta..... 15
- Figura 3.5:** Representação do modelo utilizado na simulação da coluna T02 isolada do resto da unidade, que analisa a influência do desvio 2..... 17
- Figura 3.6:** Efeito do segundo desvio nos perfis da coluna T02. Os resultados foram gerados através do simulador ASPEN PLUS usando a equação de estado RKS com parâmetros kij ajustados e pratos com eficiência de 100%..... 18
- Figura 3.7:** Influência do aumento do teor de metano na alimentação próxima ao topo da coluna T02..... 19
- Figura 3.8:** Influência do aumento do teor de metano na alimentação média da coluna T02. 19
- Figura 3.9:** Balanço de massa absoluto da unidade durante uma subida de carga. As curvas mostram a variação da vazão da corrente em relação ao seu valor inicial, que corresponde à posição zero. As ordem das legendas seguem a mesma ordem que as curvas estão dispostas. Os dados de planta foram filtrados previamente..... 21
- Figura 3.10:** Balanço de massa relativo da unidade durante uma subida de carga. As curvas mostram a variação da vazão da corrente em relação ao seu valor inicial, que corresponde a posição zero. Os dados de planta foram filtrados previamente..... 21
- Figura 3.11:** Teor de eteno das correntes do balanço de massa da unidade, durante uma subida de carga. Os dados foram filtrados previamente. As escalas foram deslocadas para facilitar a visualização. A ordem das legendas é a mesma das curvas. 22
- Figura 3.12:** Dados de planta relativos à separação nos vasos V04 e V05, durante a subida de carga..... 23
- Figura 3.13:** Tendências relativas às colunas T01 e T02 durante a subida de carga. 23
- Figura 3.14:** Representação esquemática da estrutura 1 (a) e da estrutura 2 (b). No desenho FA e FB são as vazões da carga principal das colunas T02 e T01, respectivamente, que serão usadas no cálculo de R ($R=FB/FA$). 25
- Figura 4.1:** Perfil de temperatura da coluna T02, predito por diferentes modelos termodinâmicos. 32
- Figura 4.2:** Perfis de temperatura da coluna T02, quando são utilizados os kij contidos na biblioteca do Aspen, em comparação com o caso no qual todos kij são nulos. 33
- Figura 4.3:** Influência de cada par kij no perfil de temperatura da coluna T02. 34
- Figura 4.4:** Influência do valor do kij metano-eteno nos perfis simulados de temperatura da coluna T02. O kij original se refere ao valor sugerido na biblioteca do Aspen Plus. As

	frações contidas na legenda das demais curvas correspondem ao valor que multiplicou o kij original, gerando o valor de kij utilizado na curva correspondente.....	35
Figura 4.5:	Curva da variação da temperatura no prato 19 com valor do kij metano-eteno. Estão indicados os valores do Aspen Plus e do Hysys Process.	35
Figura 4.6:	Comparação entre os resultados do Aspen Plus e Hysys Process dos perfis de temperatura das colunas de fracionamento da unidade.	40
Figura 5.2:	Perfis de temperatura da simulação dinâmica comparados com dados de planta, para as colunas de fracionamento da unidade. Os dados de planta correspondem a valores médios de trends da planta durante uma condição operacional similar à simulada, pouco afetada por perturbações.	50
Figura 5.3:	Vazão e temperatura da carga da unidade.	52
Figura 5.4:	Vazões de fundo dos vasos V04 e V05 e desvios 1 e 2.	52
Figura 5.5:	Nível do HX05 e temperaturas dos vasos V04, V05 e V06.	53
Figura 5.6:	Produto de fundo das colunas T01 e T02, e corte C2+ total produzido na unidade.....	53
Figura 5.7:	Teor de metano no produto de fundo e temperatura do prato de controle da coluna T01	54
Figura 5.8:	Teor de metano no produto de fundo e temperatura do prato de controle da coluna T02.	55
Figura 5.9:	Teor de eteno e vazões relacionadas com a coluna T03.	56
Figura 5.10:	Vazões e teor de eteno no topo da coluna T04.	56
Figura 5.11:	Dados da planta e resultados simulados para a carga da unidade e variáveis de operação relacionadas com a coluna T02. As curvas representam as variações em relação ao valor inicial. Para permitir uma melhor visualização todas as curvas foram deslocadas em 10 unidades, e algumas delas foram ampliadas. A legenda obedece à ordem das curvas.	57
Figura 5.12:	Dados de planta e de simulação que se relacionam com o controle da especificação do metano no 2º corte C2+.....	58
Figura 5.13:	Temperaturas relacionadas com a coluna T02.....	59
Figura 5.14:	Perfil de temperatura da coluna T02, com e sem a utilização do desvio 2. A malha de controle do teor do metano no produto de fundo permaneceu aberta, e a temperatura controlada foi mantida num valor constante.....	60
Figura 5.15:	Perfil da composição do metano na fase líquida da região inferior da coluna T02. Para facilitar a visualização, a escala da ordenada é logarítmica, devido à grande variação na composição de metano entre o prato 18 e o 28.	60
Figura 6.1:	Representações esquemáticas do fluxo do tipo cruzado (crossflow).....	62
Figura 6.2:	Prato de fracionamento indicando a região do líquido aerado, sobre a bandeja e no topo do downcomer, e do líquido claro, que é encontrado na base do downcomer.	62
Figura 6.3:	Pratos com borbulhadores. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).....	63
Figura 6.4:	Pratos perfurados. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).	64
Figura 6.5:	Pratos valvulados. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).	64
Figura 6.6:	Fluxo de vapor através das aberturas dos pratos, (a) borbulhadores, (b) perfurados e (c) valvulados. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).....	64
Figura 6.7:	Regimes de fluxo comuns em pratos de destilação. (a) tipo bolha, (b) tipo espuma estável, (c) tipo froth, (d) tipo spray, (e) tipo emulsão. Ilustração retirada de (Seader e Hemley, 1998).	65
Figura 6.8:	Representação esquemática de áreas e dimensões características de uma bandeja de passe simples.	66

Figura 6.10: Correlação de Fair na predição da inundação por arraste. Cada curva corresponde a um espaçamento, em polegadas, entre os pratos. Ilustração retirada do Perry et al. (1986).....	69
Figura 6.11: Comparação de dados de inundação de colunas reais, com os respectivos valores preditos por Fair, para pratos valvulados, com espaçamento de 24 in entre as bandejas, a abcissa é Flv. Ilustração de (Seader e Hemley, 1998).	70
Figura 6.12: Valores de tr_n e tr_k , a abcissa do gráfico é a diferença das densidades do líquido e do vapor, ou seja $(\rho_l - \rho_g)$ (lb/ft ³). Ilustração retirada do (Kyster, 1992). 73	73
Figura 6.13: Representação esquemática da altura do líquido claro no downcomer e dos fatores que contribuem.	74
Figura 6.15: Cálculo do h_d para pratos valvulados. Ilustração retirada do (Kyster, 1992). 76	76
Figura 6.17: Diagrama qualitativo relacionando a pressão de operação da coluna, a relação L/V e o mecanismo que define a inundação.....	78
Figura 6.18: Mecanismo de inundação de uma coluna de pratos após a subida da vazão de vapor e/ou subida da vazão de líquido.	79
Figura 6.19: Resultado típico de uma varredura realizada em uma coluna de pratos. Ilustração retirada de (Harrison e France, 1989, part 1).....	79
Figura 6.20: Varredura em uma mesma coluna operando sob três vazões de carga diferentes, a carga da coluna está indicada por <i>feed</i> . (a) vazão de projeto, (b) 120% da vazão de projeto, (c) 130% da vazão de projeto, correspondendo ao ponto de inundação. Ilustração retirada de (Xu et al., 1998).	80
Figura 6.21: Diagrama de operação da coluna, com a representação das situações de vazão de carga analisados na varredura.....	80
Figura 7.1: Dados de carga e indicativos da situação hidráulica da coluna T02, para uma situação operacional na qual esta coluna quase inundou. (a) carga total da unidade, (b) temperatura da carga da unidade, (c) variações do nível de fundo e das diferença de pressão e de temperatura entre o topo e o fundo. Estas curvas foram deslocadas em 10 unidades para permitir uma melhor visualização. (d) desvio 1 (linha contínua) e desvio 2 (linha tracejada), (e) vazão do 2º corte C2+.....	84
Figura 7.2: Perfil de temperatura da coluna T02 e outras temperaturas envolvidas na sua situação. Para permitir uma melhor visualização, graficou-se a variação das temperaturas em relação aos seus valores iniciais deslocadas de uma unidade entre si. As curvas estão na mesma ordem da legenda.	85
Figura 7.3: Dados operacionais da planta observados durante a inundação, que indicam que o mecanismo de inundação seja por arraste.....	85
Figura 7.4: Situação hidráulica das colunas T01 e T02 após a subida de carga para 200 ton/h. (a) coluna T02, inundação por arraste; (b) coluna T02, inundação no downcomer por choque, segundo o critério de Koch; (c) coluna T02, inundação no downcomer por backup; (d) coluna T01, inundação por arraste.	87
Figura 7.5: Análise da situação hidráulica dos pratos 10 e 27, relativa aos quatro casos de operação, durante o transiente de subida de carga da unidade.	88
Figura 7.6: Impacto da vazão do desvio 1 na variação das vazões do corte C2+ e na soma do corte C2+ total com o reciclo metano-eteno.	91
Figura 7.7: Condições do vaso V04 e do reciclo metano-eteno com a utilização do desvio 1. 91	91
Figura 7.8: Comportamento dinâmico da inundação nos pratos 10 e 27 para o caso no qual a relação entre as duas cargas da unidade é mantida constante (R constante), e para o caso no qual a relação é variada pela vazão de fundo da coluna T02 (R varia)....	93

- Figura 7.9:** (a) Valor da relação R entre as cargas da coluna T01 e T02 frente à subida de carga, conforme a estratégia de controle utilizada. R constante: relação entre as cargas é mantida constante, R varia: R corrigido pela vazão de fundo da coluna T02. (b) Vazão do fundo da coluna T02 para o caso no qual R varia.93
- Figura 7.10:** Representação da estrutura de controle proposta 2 modificada. (a) Na primeira modificação, o set-point para a relação R é enviado pelo controlador da vazão de fundo da coluna. (b) Na segunda modificação, o desvio 1 é usado para controlar diretamente a vazão da alimentação principal da coluna T02, e o set-point desta malha vem do controlador da vazão do produto de fundo desta coluna.....94
- Figura 7.11:** Comportamento dinâmico da inundação nos pratos 10 e 27 da coluna T02, para os casos no qual a relação entre as duas cargas da unidade é mantida constante (R constante) e o caso no qual o desvio 1 controla a vazão da carga principal, com o set-point sendo enviado pela vazão do 2° corte C2+ (controla carga T02).....95
- Figura 7.12:** Comportamento das variáveis controladas da estrutura modificada, no caso em que a carga principal da coluna T02 é controlada, frente a uma subida de carga da unidade. Plotou-se a vazão da carga principal e a vazão do produto de fundo da coluna T02 (2° corte C2+).....95
- Figura 7.13:** Percentagem de inundação por arraste, conforme a correlação empírica de Fair, para a estrutura de controle *atual* e para a *estrutura 2* proposta, quando a vazão de fundo da coluna T02 é igual a 65 ton/h, nos dois casos.....96
- Figura 7.14:** Comparação entre o perfil das percentagens de inundação da coluna T02, para os três casos de composição de carga da unidade mostrados na tabela 7.5, com uma mesma carga de processamento (200 ton/h).97

Lista de tabelas

Tabela 3.1: Resultados comparativos da simulação estacionária da coluna T02, sem a utilização do desvio 2, e com a utilização do desvio 2.....	16
Tabela 4.1: Componentes utilizados nas simulações estacionárias.....	28
Tabela 4.2: Valores dos Parâmetros kij para os pares de componentes, segundo a biblioteca do simulador Aspen Plus. As células vazias correspondem a kij iguais a zero. ...	33
Tabela 4.3: Valores dos Parâmetros kij utilizados nas simulações estacionárias comparativas entre o Aspen Plus e o Hysys Process.	37
Tabela 4.4: Corrente de carga e correntes que deixam a unidade.	38
Tabela 4.5: Vasos de flash da unidade.	38
Tabela 4.6: Colunas de fracionamento da unidade.	39
Tabela 5.1: Composição da carga da unidade utilizada nas simulações dinâmicas.	44
Tabela 5.2: Correntes que alimentam ou deixam a unidade representada na simulação dinâmica.	47
Tabela 5.3: Teores de metano e eteno das correntes que deixam a unidade.	47
Tabela 5.4: Comparação entre resultados da simulação e dados de planta para os vasos de separação.	48
Tabela 5.5: Comparação entre resultados da simulação e dados de planta para as colunas de fracionamento, relativa as vazões de topo e fundo e pressão de operação.....	49
Tabela 7.1: Vazões das correntes que deixam a unidade, para as quatro situações simuladas.	89
Tabela 7.2: Eteno contido nas correntes que deixam a planta, para os quatro casos simulados.	89
Tabela 7.3: Vazão do desvio 1 e seu reflexo no corte C2+ e no reciclo metano-eteno. ..	90
Tabela 7.4: Situação comparativa da unidade desmetanizadora operando na situação <i>atual</i> e na <i>estrutura 2</i> , mantendo-se a vazão do 2º corte C2+ igual.	96
Tabela 7.5: Composição da carga para os três casos avaliados.	97

Capítulo 1

Introdução

Esta tese de mestrado se valeu de um caso real de uma unidade desmetanizadora em plena atividade, para realizar um estudo sistemático, baseado nos fundamentos da engenharia química, de avaliação da problemática desta planta, com o objetivo de se propor soluções que permitissem o aumento da produção.

A unidade desmetanizadora tem o objetivo de separar uma corrente de gás seco craqueado proveniente dos fornos de nafta em uma corrente de hidrogênio, duas de metano e duas mais de um corte constituído por eteno e mais pesados. Atualmente, porém, a planta não tem uma situação operacional satisfatória, devido a restrições hidráulicas verificadas numa de suas colunas desmetanizadoras, que apresenta problemas de inundação quando operada a elevadas cargas. Esse problema de inundação limita a carga total da unidade num patamar abaixo do esperado. Para resolver este problema, o corpo de engenharia responsável pela unidade implantou alguns alinhamentos alternativos (desvios 1 e 2) que possibilitaram que a unidade processasse a carga desejada, porém foram verificados aumentos consideráveis nas perdas da unidade.

Como a planta em questão tem uma elevada integração energética e um grande número de ciclos mássicos, a compreensão das relações causa e efeito torna-se um tanto complexa. Devido a isto, não se tinha um entendimento muito claro das causas da inundação na coluna de fracionamento e nem dos próprios papéis desempenhados pelos desvios implantados no processo.

Foi feito um estudo da situação operacional da planta, que apontou imperfeições na estrutura de controle atualmente utilizada, que leva à sobrecarga da Coluna Desmetanizadora Secundária, em detrimento da Coluna Desmetanizadora Primária, resultando na sua subutilização. Foram então propostas duas estruturas de controle alternativas, que, por diferentes filosofias, procuravam evitar o carregamento desproporcional das duas colunas fracionadoras.

1.1 Enfoque do trabalho

O entendimento da problemática da unidade envolveu o desenvolvimento de simulações estacionárias em simuladores comerciais que reproduziram satisfatoriamente as condições de planta. Posteriormente foram desenvolvidas também simulações dinâmicas, que pudessem mostrar o comportamento dinâmico da unidade. Um dos fatores positivos desta unidade é que ela é extremamente bem instrumentada, e uma grande quantidade de dados de planta foram disponibilizados, inclusive dados relativos a tendências durante transientes, que foram muito úteis na validação do modelo dinâmico.

Com um bom modelo dinâmico, restava então o aprofundamento do entendimento dos mecanismos que podem levar colunas de pratos à inundação. Após esta etapa, pode-se realizar simulações dinâmicas da unidade sob quatro condições operacionais diferentes, que são: configuração de *projeto*, situação *atual*, *estrutura 1* e *estrutura 2*, as duas últimas mencionadas se referem às soluções propostas.

Os resultados das simulações dinâmicas relativas aos quatro casos foram então comparados, em relação aos seus desempenhos hidráulicos e quanto a produção do corte C2+, que é o grande objetivo da unidade. As duas soluções propostas apresentaram resultados superiores do que as situações atual e de projeto. Como a *estrutura 2* possui a qualidade de poder ser implementada sem a parada da unidade, ela foi escolhida e aprimorada. Foram feitas mudanças nesta estrutura de controle que melhoraram ainda mais o seu desempenho. Por fim, foram sugeridas outras melhorias, que ainda não foram estudadas, como propostas para trabalhos futuros.

1.2 Estrutura de dissertação

A dissertação está dividida em oito capítulos incluindo a conclusão. O segundo capítulo, que vem a seguir, faz uma descrição sucinta da unidade desmetanizadora, citando peculiaridades e objetivos dos equipamentos. O terceiro capítulo discute a problemática da unidade, analisando as origens do problema e a estrutura de controle atual, bem como apresenta os papéis desempenhados pelos desvio 1 e 2. As soluções de controle propostas são apresentadas. Também é feita uma análise do comportamento das perdas da planta com a subida da carga de processamento.

O quarto capítulo trata do desenvolvimento da simulação estática, quando foram utilizados dois simuladores comerciais disponíveis, o Aspen Plus e o Hysys Process. Foi realizado um estudo mais profundo em relação à modelagem termodinâmica indicada para o processo, que acabou por apontar para a importância do bom ajuste do parâmetro de interação binária do par metano-eteno. Por fim foi feita uma comparação dos resultados obtidos pelos dois simuladores, que se mostraram bastante similares.

A próxima etapa, expressa no quinto capítulo, trata do desenvolvimento da simulação dinâmica com a utilização do Aspen Dynamics, que foi o simulador que se mostrou mais apto para realizar a tarefa. São citadas as simplificações efetuadas que permitiram reduzir consideravelmente o tempo de processamento. Foram realizadas comparações com dados da

planta que permitiram afirmar que o modelo estava reproduzindo os principais comportamentos dinâmicos observados na unidade.

O sexto capítulo trata da hidráulica de coluna de pratos, iniciando com uma seção de conceitos básicos sobre este tipo de colunas, seguido por outra seção que apresenta os mecanismos de inundação, bem como as correlações empíricas propostas para prever a inundação. Este capítulo finaliza com um conjunto de pontos que devem ser levados em conta na análise de uma coluna real.

O sétimo capítulo traz o resultado das simulações dinâmicas realizadas e analisa as situações hidráulicas estabelecidas. São feitas verificações da hidráulica das colunas durante regimes estacionários e ao longo de transientes referentes a subidas de carga da unidade. Foi possível definir as regiões críticas das colunas e avaliar a natureza da inundação. Neste capítulo foram constatadas as vantagens da *estrutura 2*, e realizadas as melhorias que permitiram a sugestão de uma alternativa viável que pode ser implementada imediatamente na unidade.

Por fim o oitavo capítulo lista os principais resultados obtidos e as conclusões deste trabalho, sugerindo ainda algumas melhorias que ainda podem ser feitas nas simulações projetando trabalhos futuros.

Capítulo 2

Descrição da Unidade

2.1 Localização e Objetivos da Unidade Desmetanizadora

A unidade desmetanizadora faz parte de uma central petroquímica, recebendo a corrente de gás dos fornos de craqueamento de nafta, que já foi tratada previamente numa unidade de secagem, denominada gás comprimido seco. Esta unidade vai produzir um corte de eteno e mais pesados, retificados dos componentes mais leves. A figura 2.1 expressa melhor a função da unidade na central petroquímica.

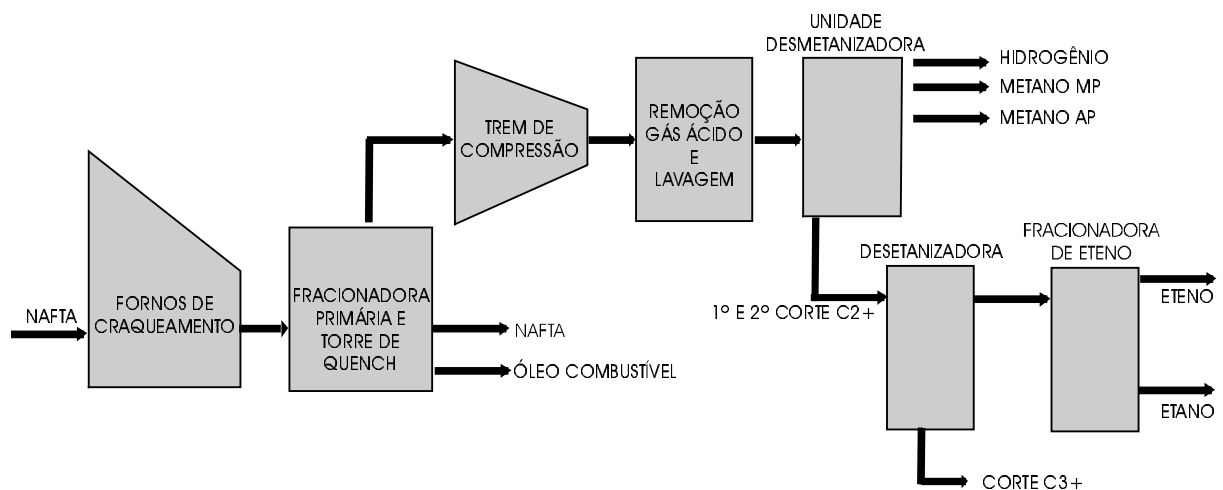


Figura 2.1: Localização da unidade desmetanizadora na planta petroquímica. Na figura metano MP representa a corrente de metano de média pressão, e metano AP se refere a corrente de metano de alta pressão

Detalhando um pouco mais, pode-se dizer que a unidade estudada tem por objetivo separar uma corrente de gás comprimido seco em correntes produto de metano, hidrogênio e outras duas correntes constituídas por um corte de C2 e mais pesados (corte C2+). Esta unidade deve efetuar este serviço atingindo uma recuperação de 99,5 % do eteno contido no gás de carga, além de garantir que os cortes C2+ tenham uma contaminação máxima de 300 ppm mol de metano em relação ao eteno (figura 2.2).

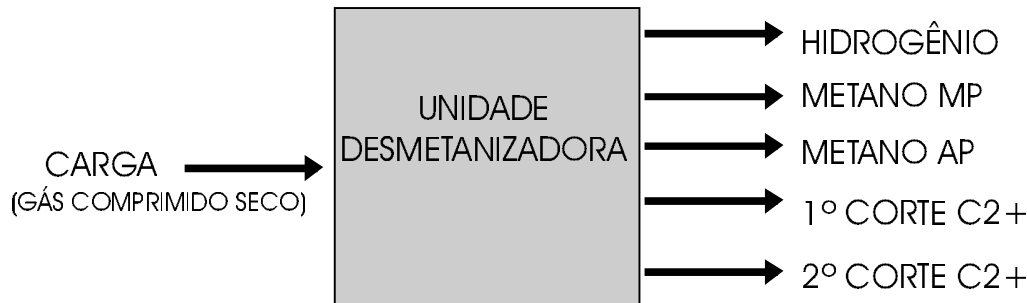


Figura 2.2: Representação em bloco da unidade desmetanizadora.

A corrente de hidrogênio será enviada para a Unidade de Purificação de Hidrogênio (PSA), responsável por produzir uma corrente de hidrogênio de alta pureza (99,99 %), utilizada em várias reações de hidrogenação da unidade petroquímica. As correntes de metano são utilizadas inicialmente para resfriar outras correntes, sendo posteriormente enviadas para gás combustível, para a queima nos fornos. Também é produzida uma corrente de reciclo de metano-etileno, que é retornada para a unidade anterior.

Os dois corte de C2+ produzidos nesta unidade são enviados para a coluna desmetanizadora, que produz uma corrente de C2 (etano e eteno) no topo, e um corte C3+ no fundo. Deve-se salientar que o metano que não foi removido na unidade desmetanizadora acabará incorporando à corrente de eteno, podendo tirá-la de especificação.

2.2 Descrição da unidade

Como foi visto, a boa operação da Unidade Desmetanizadora é fundamental para a posterior obtenção do eteno produto. Para atender esta meta a unidade, que opera em dois níveis de pressão (abaixo de 16 kgf/cm² e acima de 32 kgf/cm²), possui um trem frio, (“*cold box*”) que vai resfriando sucessivamente a carga, e condensando frações da corrente principal, que são separadas em vasos de flash, produzindo diversas correntes de composições variadas. Estas correntes são enviada para quatro colunas de fracionamento, responsáveis pela obtenção das correntes de produto.

Para um melhor entendimento da unidade, representada na figura 2.3, optou-se por dividir a unidade em duas regiões: a região responsável pela obtenção do produto, e a região responsável pela recuperação do eteno.

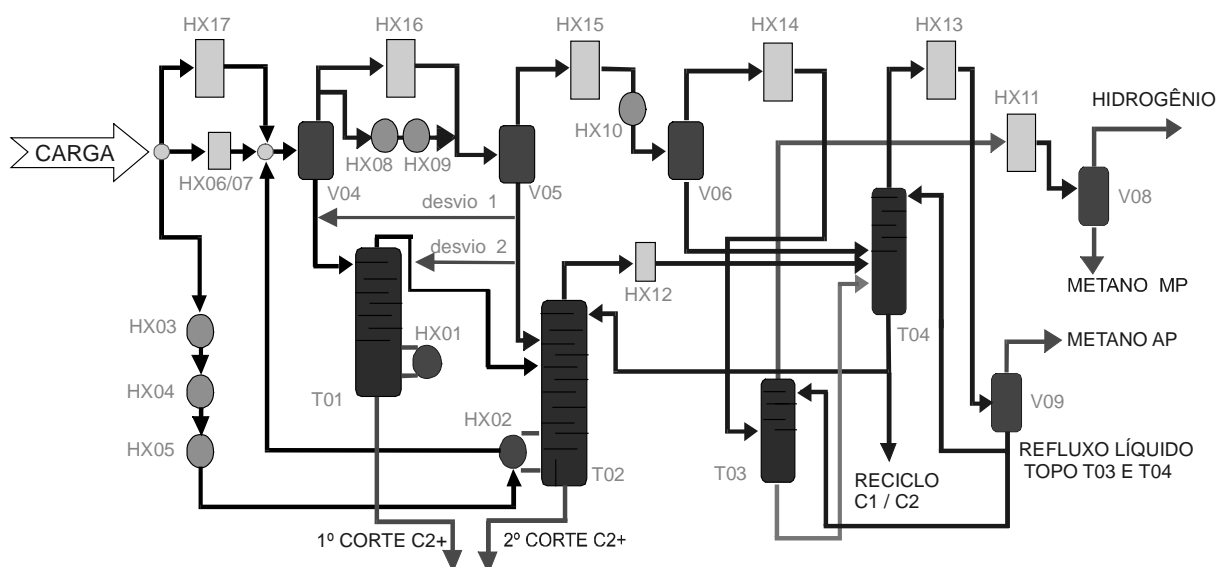


Figura 2.3: Representação simplificada da unidade desmetalizadora.

2.2.1 Obtenção de eteno produto

A primeira região da unidade está relacionada com a obtenção dos dois cortes de C2+ com o teor de metano adequado.

O gás de processo chega à unidade com uma temperatura próxima de 15 °C e pressão de 40 kgf/cm². A carga é dividida em três ramais, sendo que o principal contém mais de 80% da vazão, que serão resfriados e condensados parcialmente. O ramo principal passa inicialmente por três trocadores de calor (HX03, HX04 e HX05) casco e tubo, onde propeno refrigerante (lado do casco) é utilizado para resfriar o gás de processo (tubos). A carga térmica do HX05 é manipulada pelo controlador de temperatura do prato mais sensível da coluna T02. O set-point da temperatura do prato é definido pelo controlador de metano na corrente de C2+ desta torre. Após deixar o HX05, o ramo principal da carga é utilizado como fonte de calor do refeedor (HX02) da coluna Desmetalizadora Secundária (T02), ocorrendo um resfriamento adicional.

Após o HX02, o ramo principal volta a se misturar com os outros dois ramais secundários, que também foram resfriados previamente. Um dos ramais secundários foi resfriado nos trocadores de calor HX06 e HX07. O outro ramo secundário foi resfriado no último trocador do trem frio (HX17). A corrente resultante da mistura dos três ramais está parcialmente condensada, e é enviada para o primeiro vaso de flash da unidade (V04).

Este vaso opera na zona de alta pressão da unidade (acima de 32 kgf/cm²) e a sua temperatura é de aproximadamente -35 °C. A corrente condensada deste vaso sofre uma expansão ao ingressar na zona de pressão moderada (abaixo de 16 kgf/cm²), sendo parcialmente vaporizada, constituindo a única carga da primeira coluna desmetalizadora (T01). A alimentação é feita acima do prato de topo, e a carga da coluna tem a função adicional de fornecer o refluxo líquido desta torre de fracionamento, que não possui condensador de topo. O calor do refeedor (HX01) da coluna T01 é fornecido pela

condensação de vapor de propeno, proveniente do ciclo do propileno refrigerante da planta petroquímica. A carga térmica do HX01 é manipulada pelo controlador de temperatura do prato mais sensível da coluna, que recebe o set-point do controlador de metano no corte C2+ produzido nesta coluna (1° corte C2+).

Retornando à zona de alta pressão, a corrente vapor do vaso V04 é resfriada novamente, desta vez com um ramal de cerca de 20% da corrente, trocando calor por um trocador pertencente ao trem frio (HX16), sendo a fração restante resfriada em dois trocadores casco e tubo (HX08 e HX09). O frio é cedido pelo etileno refrigerante no lado do casco, que garante o resfriamento desejado para esta corrente. As duas correntes são novamente misturadas e direcionadas para o segundo vaso de flash (V05). A corrente líquida deste vaso, após expandida para a zona de pressão moderada, constitui a carga principal da coluna Desmetanizadora Secundária (T02).

A coluna T02 é responsável pelo segundo corte de C2+ da unidade (2° corte C2+). Esta coluna possui três cargas, que são o destilado vapor da coluna T01, a corrente de fundo do vaso V05 e uma corrente líquida de reciclo proveniente do fundo da coluna T04. Esta última corrente retorna eteno para ser recuperado, sendo alimentada no topo da coluna T02, atuando como seu refluxo líquido, visto que esta torre também não possui condensador de topo.

O 2° corte C2+ deve conter todo o eteno e compostos dos mais pesados que não foram retirados no 1° corte C2+ produzido na coluna T01. O eteno remanescente estará contido na corrente de reciclo metano/etileno, ou constituirá a perda da unidade.

Pode-se perceber então que a boa operação das colunas T01 e T02 está ligada à condição do vaso V04. Se o vaso operar com uma temperatura acima da ideal, ele condensará uma menor fração do corte C2+ contido na carga da unidade, acabando por enviar pouca carga à coluna T01, sobrecarregando a coluna T02. O oposto ocorrerá quando o vaso operar com uma temperatura menor do que a ideal.

2.2.2 Recuperação de eteno

A segunda região da unidade tem a tarefa de fazer com que a perda de eteno não ultrapasse 0,5% do contido na carga. A corrente vapor do vaso V05 ainda contém muito eteno, que deve ser recuperado. Para que isso ocorra, esta corrente é resfriada no HX15 (pertencente ao trem frio) e no trocador casco e tubo HX10. A fração condensada é coletada no vaso V06, e, após expandida, é enviada para a coluna Retificadora de Metano (T04), que opera na zona de baixa pressão. Esta coluna também recebe como cargas o destilado vapor da coluna T02, após ser resfriado no HX12, e o produto de fundo da coluna T03.

O vapor proveniente do vaso V06 é resfriado no trocador de calor HX14, pertencente ao trem frio, sendo carga da coluna Absorvedora de Etileno (T03). O vapor desta coluna é composto por metano e hidrogênio e um resíduo de eteno. Esta corrente é resfriada (HX11) e enviada para o vaso V08. O vapor de topo deste vaso é a corrente de hidrogênio da unidade. O produto de fundo, constituído majoritariamente por metano, é expandido para atingir

temperaturas extremamente baixas, gerando uma corrente de metano de média pressão (metano MP).

O vapor de topo da coluna T04 é resfriado no HX13, e condensado parcialmente no vaso V09. A corrente líquida deste vaso é dividida em duas correntes, que são utilizadas como refluxo líquido das colunas T03 e T04. A corrente de topo deste vaso corresponde a corrente de metano de alta pressão (metano AP). O produto de fundo da coluna T04 é parcialmente recirculado para a coluna T02, retornando o eteno recuperado na segunda região da unidade, a outra fração do produto de fundo é o reciclo de metano/eteno, que retorna para a unidade anterior da planta petroquímica.

As correntes de metano MP e de metano AP são os pontos de perda de eteno da unidade. As correntes de hidrogênio, metano MP, metano AP e reciclo metano-eteno são utilizadas no trem frio como fontes de frio.

O entendimento desta unidade desmetanizadora é uma tarefa muito interessante, devido ao elevado grau de integração energética e ciclos mássicos envolvidos. O próximo capítulo discutirá a problemática da planta, que atualmente não opera de maneira satisfatória, em consequência de problemas hidráulicos verificados em uma de suas colunas, que limitam a sua produção.

Capítulo 3

Entendendo a Problemática da Unidade

A unidade desmetanizadora é caracterizada por uma elevada integração energética, que lhe confere uma diminuição nos custos energéticos, às custas de uma operação mais complexa e de entendimento mais difícil. A planta possui duas zonas de pressão (alta e moderada) e diferentes níveis de temperatura, que variam desde 15 °C até cerca de -150 °C. As baixas temperaturas possibilitam que várias correntes que deixam a planta sejam utilizadas para resfriar correntes de carga da unidade, ou seja, estão diretamente relacionadas com a integração energética. O fato de várias colunas operarem na faixa de pressão moderada é que permite que se atinjam temperaturas mais baixas, proporcionando uma economia de energia no trem de compressão da planta petroquímica.

A insatisfação com relação à operação desta unidade está relacionada com a inundação na coluna T02 frente à subida de carga da unidade, que parece estar ligada ao laço energético existente entre o refeedor desta coluna (HX02) e o ramal principal da carga da unidade. Porém esta relação não estava muito clara. Outro fator que causava dúvidas era o perfil atípico de temperatura desta mesma coluna, que possui um patamar intermediário de temperatura quase constante. Fato este não explicado e não reproduzido em simulações estáticas efetuadas pelo grupo de engenharia responsável pela unidade.

Tudo isto, somado ao fato de que a recuperação de eteno da unidade estar aquém do desejado, faz com que um melhor entendimento da unidade se torne prioritário, na busca de uma solução para o problema. A seguir é apresentado um estudo sistemático da unidade, através de análise de dados de operação e simulações de partes específicas do processo, visando um melhor entendimento dos fatores relacionados com a problemática da unidade.

3.1 Efeito das Pressões

O primeiro aspecto estudado está relacionado com a influência das zonas de pressão alta (acima de 32 kg/cm²) e moderada (abaixo de 16 kg/cm²) da unidade. A redução da pressão possui dois efeitos fundamentais no comportamento da unidade: 1. Facilita a separação, através do aumento da volatilidade relativa entre etileno e metano (Figura 3.1); 2.

Vaporiza parcialmente a corrente, afetando, dessa forma, a carga térmica das colunas T01 e T02.

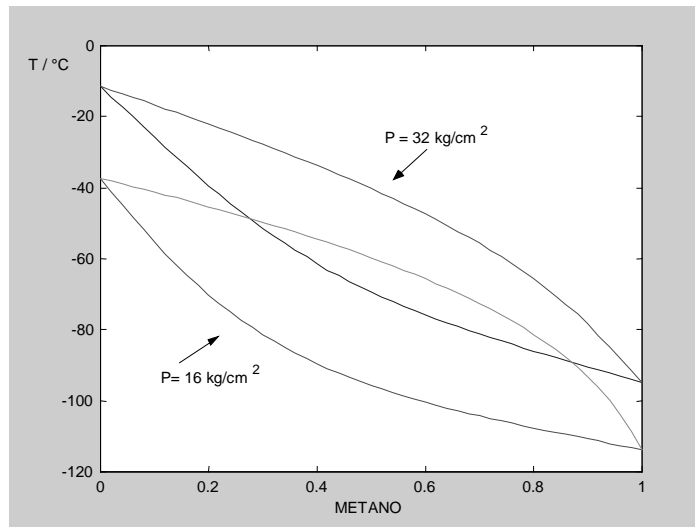


Figura 3.1: Curvas de equilíbrio metano-eteno calculadas através do método de Peng-Robinson para os dois níveis de pressão da unidade.

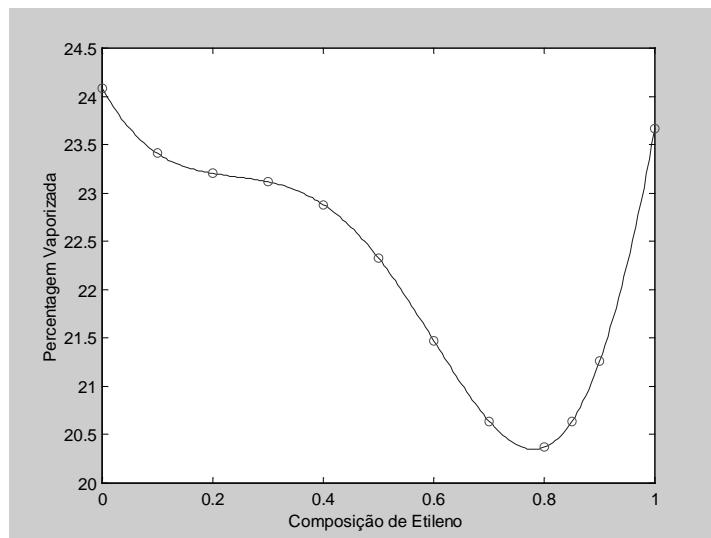


Figura 3.2: Percentagem vaporizada (base molar) vs. fração molar de etileno produzida por uma mistura líquida saturada de metano e etileno quando expandida isoentalpicamente de 32 para 16 kg/cm². O modelo de Peng-Robinson com entalpias calculadas pelo método de Lee-Kesler implementado no simulador Hysys Process foi utilizado na geração desse gráfico.

A Figura 3.2 mostra o efeito da composição de etileno na percentagem vaporizada produzida pelo flasheamento isoentálpico de 32 para 16 kg/cm². Através dessa figura pode-se concluir que existe uma moderada variação da quantidade vaporizada frente a uma variação na composição de etileno. Essa variação afeta a carga térmica das colunas de destilação envolvidas. Até a composição de 0,8 de etileno (em base molar) um aumento da composição de etileno é acompanhado pela diminuição da percentagem da corrente que é vaporizada e,

portanto, requerendo uma maior carga térmica para a vaporização da corrente total. Isso pode ser visto, para o entendimento das condições de operação das colunas, como equivalente a um aumento da retirada de calor de topo das colunas. Acima da composição de 0,8 de etileno o efeito do aumento da composição de etileno se inverte.

Em suma, como as correntes líquidas provenientes dos vasos V04 e V05 possuem composição em etileno inferior a 80 %, em base molar, pode-se concluir que quanto mais rica a corrente for em etileno maior será a quantidade de calor retirado no topo das colunas produzindo um deslocamento do perfil de temperatura para baixo.

3.2 Caracterização do problema

Como já foi citado, atualmente a unidade não opera em condições satisfatórias, os principais problemas estão relacionados com:

1. Inundação da coluna T02:

A coluna desmetanizadora secundária apresenta problemas de inundação quando a carga da unidade é elevada.

Com o objetivo de melhorar a situação hidráulica da coluna T02, foram implantados dois desvios, que são o desvio 1 e o desvio 2 (observe a sua representação na figura 2.3). O desvio 1 desvia parte da carga da coluna T02 proveniente do fundo do vaso V05 para a corrente de carga da coluna T01. Já o desvio 2 redireciona parte da carga da coluna T02 que seria alimentada próxima ao topo, para uma região mais intermediária. Este segundo desvio procura aliviar a seção superior desta coluna, que era onde se acreditava iniciar a inundação.

2. Perda de eteno:

A recuperação de eteno na unidade, que conforme o projeto deveria ser de 99,5% do eteno contido na carga da unidade, está abaixo deste valor. O resultado do balanço de massa aponta para uma recuperação de 97,6%.

3.3 Entendendo as origens dos problemas

O grande responsável pelos problemas operacionais apresentados pela unidade (ou seja, inundação e baixa recuperação de eteno), é a atual estrutura de controle que está sendo utilizada para controlar a unidade. Para se entender o problema dessa estrutura de controle será feita uma simulação mental do que acontece com o aumento de carga na unidade. Assume-se, por simplicidade, que a composição da carga permaneça constante e que haja um aumento na vazão de alimentação. Esta análise do processo será comprovada através dos dados de planta coletados durante uma situação de aumento de carga.

3.3.1 Inundação da coluna T02

Num primeiro momento os ramais recebem um aumento de carga, acompanhe na Figura 3.3 em (a) e (b). A corrente principal é resfriada nos trocadores tipo casco e tubo HX03, HX04 e HX05. Nestes equipamentos é usado propeno refrigerante (PR) no lado do casco para retirar o calor da carga da unidade. Os trocadores HX03 e HX04, possuem uma carga térmica quase constante. Já o trocador HX05 tem a sua carga térmica manipulada para controlar a temperatura de um prato intermediário da coluna T02. O set-point deste prato por sua vez é definido, em cascata, pelo teor de metano no corte C2+ produzido nesta coluna. Observando os dados de planta, percebe-se que num primeiro momento ocorre uma diminuição no nível de propeno refrigerante do HX05, observe em (c), no período que vai de 15 até 20 horas, provocada pela troca térmica maior do que a esperada. Deste modo a carga da unidade chega mais aquecida e com uma vazão maior no refeedor (HX02) da coluna T02, provocando vaporização excessiva no fundo desta coluna (d), observe que o nível desta coluna passa a oscilar entre 15 até 20 horas, estabilizando depois num nível mais baixo.

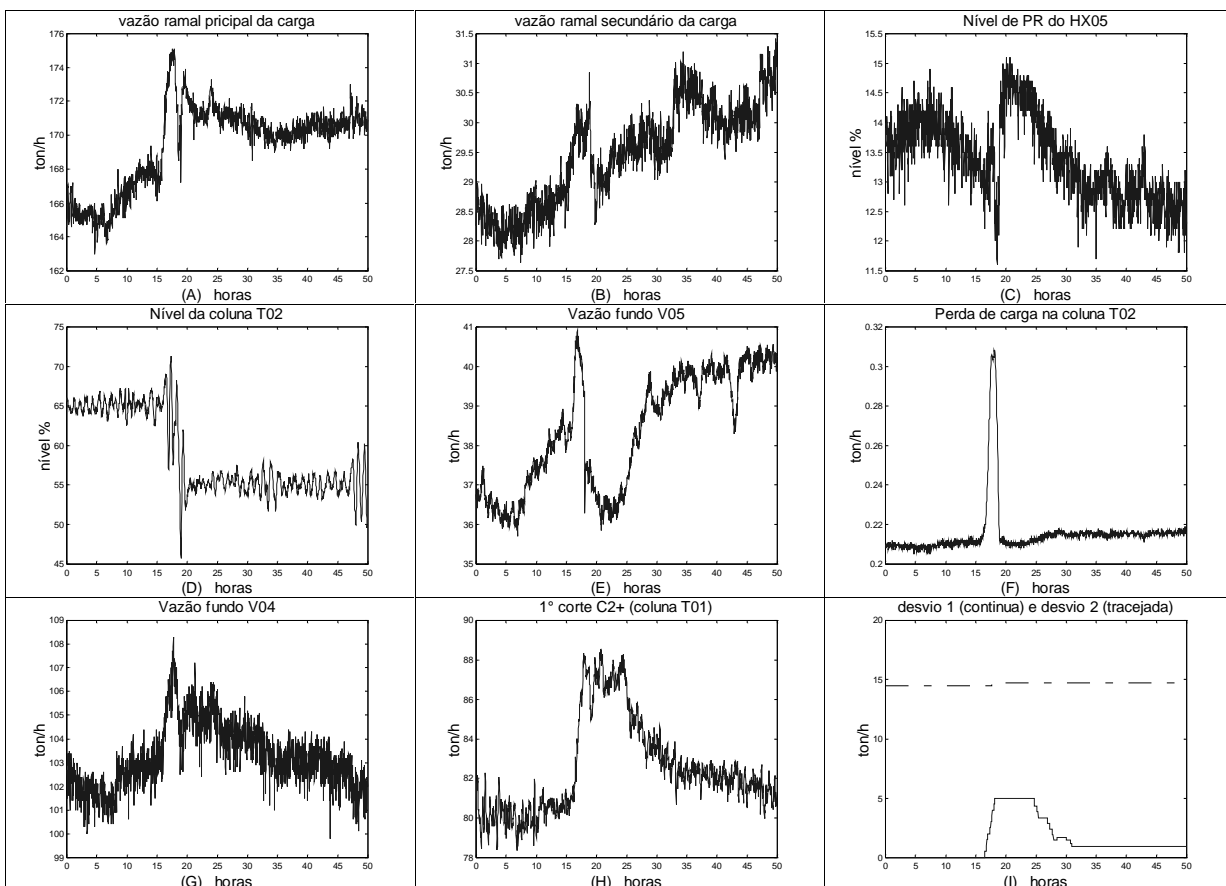


Figura 3.3: Dados da tendência da planta durante uma subida de carga da unidade.

Após passar pelo refeedor HX02 a carga principal junta-se novamente com os ramais secundários de carga, chegando ao vaso V04 com uma temperatura maior do que a recomendada. Isto faz com que uma fração menor da carga do que seria recomendável condense neste vaso, enviando menos carga do que o ideal para a coluna T01, retirando uma vazão de produto de fundo menor nesta coluna ((h), 1º corte C2+). Como a corrente vapor do V04 será resfriada eficientemente a $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$, pois o HX08 e o HX09 garantem isto, uma vazão de corrente líquida bem maior que a normal será retirada no fundo do vaso V05, conforme

pode ser comprovado através do pico em (e), por volta de 17 horas, antes da abertura do desvio 1, isto provoca um aumento acima do esperado na carga principal da coluna T02. Neste momento a coluna T02, que já estava com uma vaporização excessiva no fundo provocada pelo aumento do calor injetado no refeedor HX02, sofre um aumento excessivo no refluxo interno de líquido, o que acabaria por levar a coluna à inundação.

A oscilação no nível da coluna em (d), e o pico da queda da pressão da coluna (f), indicam que neste momento a coluna está prestes a inundar. A ação que evitou a completa inundação da coluna foi a abertura do desvio 1, observe em (i).

Por fim, com base nos trends (g) e (h), verificou-se que após decorridas algumas horas (mais de 40 horas), apesar da carga continuar elevada (cerca de 200 ton/h), as vazões de fundo do V04 e da T01 possuem valores pouco superiores aos correspondentes a carga mais baixa (190 ton/h), com tempos inferiores a 10 horas. Lembre-se que se a vazão da alimentação for aumentada por um fator Z , mantendo-se a composição da alimentação constantes, o processo terá que aumentar as respectivas vazões de produto pelo mesmo fator Z caso se queira manter as mesmas especificações. Isso não se verifica no produto de fundo da T01, conforme mostra (h).

Em suma, com a atual estratégia de controle, devido à temperatura do vaso V04 ser maior do que a ideal, o etileno que deveria estar saindo na coluna T01 acaba sendo deslocado para a coluna T02 podendo levar à inundação da mesma, caso não sejam tomadas medidas corretivas. As medidas corretivas utilizadas para evitar a inundação foram os desvios de parte da vazão de líquido do vaso V05. Graças a esses desvios a coluna T02 acabou não inundando (conforme (f) e (i)). A seguir vamos analisar mais atentamente o papel desempenhado por esses desvios, que podem ser vistos na figura 3.4.

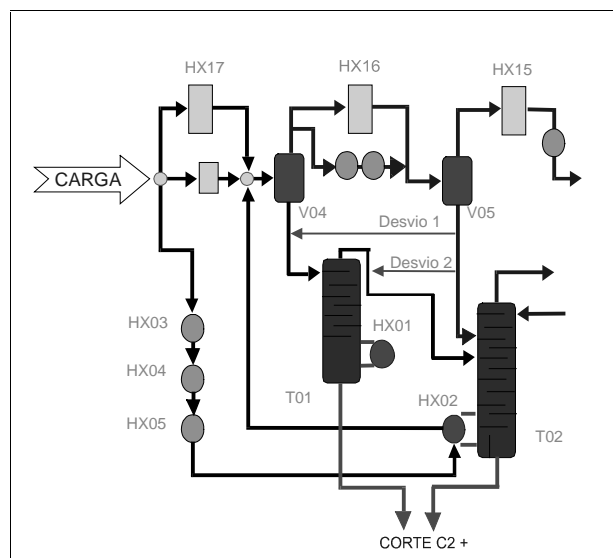


Figura 3.4: Localização dos desvios 1 e 2 na planta.

3.3.2 Papel desempenhado pelos desvios

Desvio 1

O desvio 1 redireciona parte da corrente líquida do vaso V05 para a carga da T01. O primeiro efeito deste alinhamento é o aumento de carga da coluna, o que permite uma maior retirada de produto de fundo, aliviando o resto da unidade. Como a carga desta coluna também opera como reciclo de topo, o uso deste desvio corresponderia a um aumento do frio do condensador da coluna, pois além de aumentarmos a vazão de líquido, adiciona-se uma corrente a $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ numa corrente que estaria a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Esse efeito do desvio 1 é comprovado através dos dados de planta já mostrados na Figura 3.3. Observe que quando o desvio 1 tem sua vazão aumentada, veja (i), entre 18 e 25 horas, o produto de fundo da coluna T01 sobe (h), diminuindo novamente quando a vazão deste desvio é reduzida. O que mostra que o desvio 1 tem potencial para aumentar a vazão do corte C2+ na coluna T01.

Desvio 2

O segundo desvio passa parte da corrente líquida do fundo do vaso V05 para a tubulação que traz o destilado vapor do topo da T01 para a bandeja 16 (prato teórico 11) da T02. Assim, parte da corrente líquida que seria injetada próxima do topo da T02 (bandeja 6, prato teórico 4), onde faria papel de reciclo, é alimentada na seção central da coluna.

O projeto previa que o prato teórico 11 receberia uma corrente inteiramente vaporizada, com uma temperatura mais quente que a do prato. Com o desvio 2, passa a receber parte da corrente liquefeita, com uma temperatura mais fria do que a da bandeja. Para analisar o efeito disso, foi simulada a condição da T02 em duas condições operacionais, com o uso do desvio, e sem o uso do desvio. A figura 3.5 ilustra melhor esta simulação, quando optou-se por separar a coluna T02 do resto da unidade, para que se avaliasse melhor o efeito do desvio na própria coluna, sem receber a influência de alterações ocasionadas em outras partes do sistema.

A simulação foi realizada com uma carga térmica constante no referedor HX02, numa situação foi simulada a utilização do desvio 2, e em outra situação foi simulada a situação da coluna T02 sem o uso do desvio 2. Os resultados das correntes de topo e fundo para as duas situações estão demonstrados na tabela abaixo.

Tabela 3.1: Resultados comparativos da simulação estacionária da coluna T02, sem a utilização do desvio 2, e com a utilização do desvio 2.

Coluna T02		sem desvio		com desvio	
		Fundo	Topo	Fundo	Topo
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	-39,6	-82,8	-41,5	-82,0
Vazão molar	kgmol/hr	1895	1824	1906	1835
Vazão mássica	kg/hr	55651	33153	55772	33570
Vazão eteno	kgmol/hr	1492,8	379,1	1487,5	398,4
X eteno	fração molar	0,79	0,21	0,78	0,22

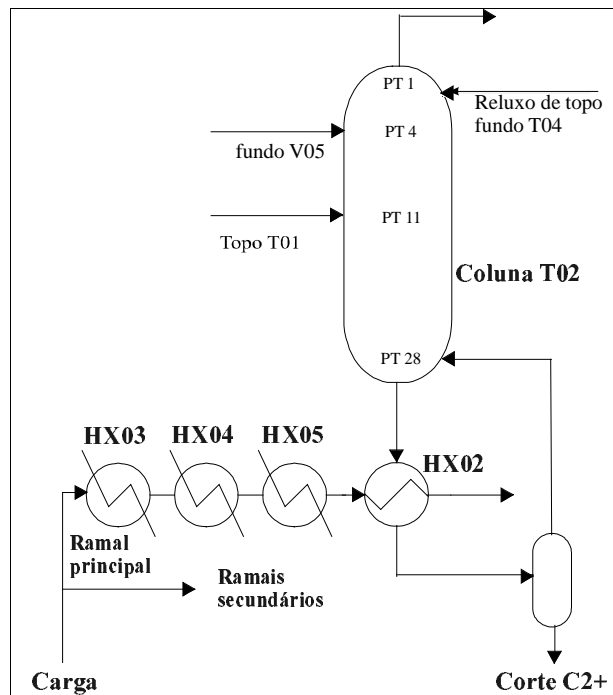
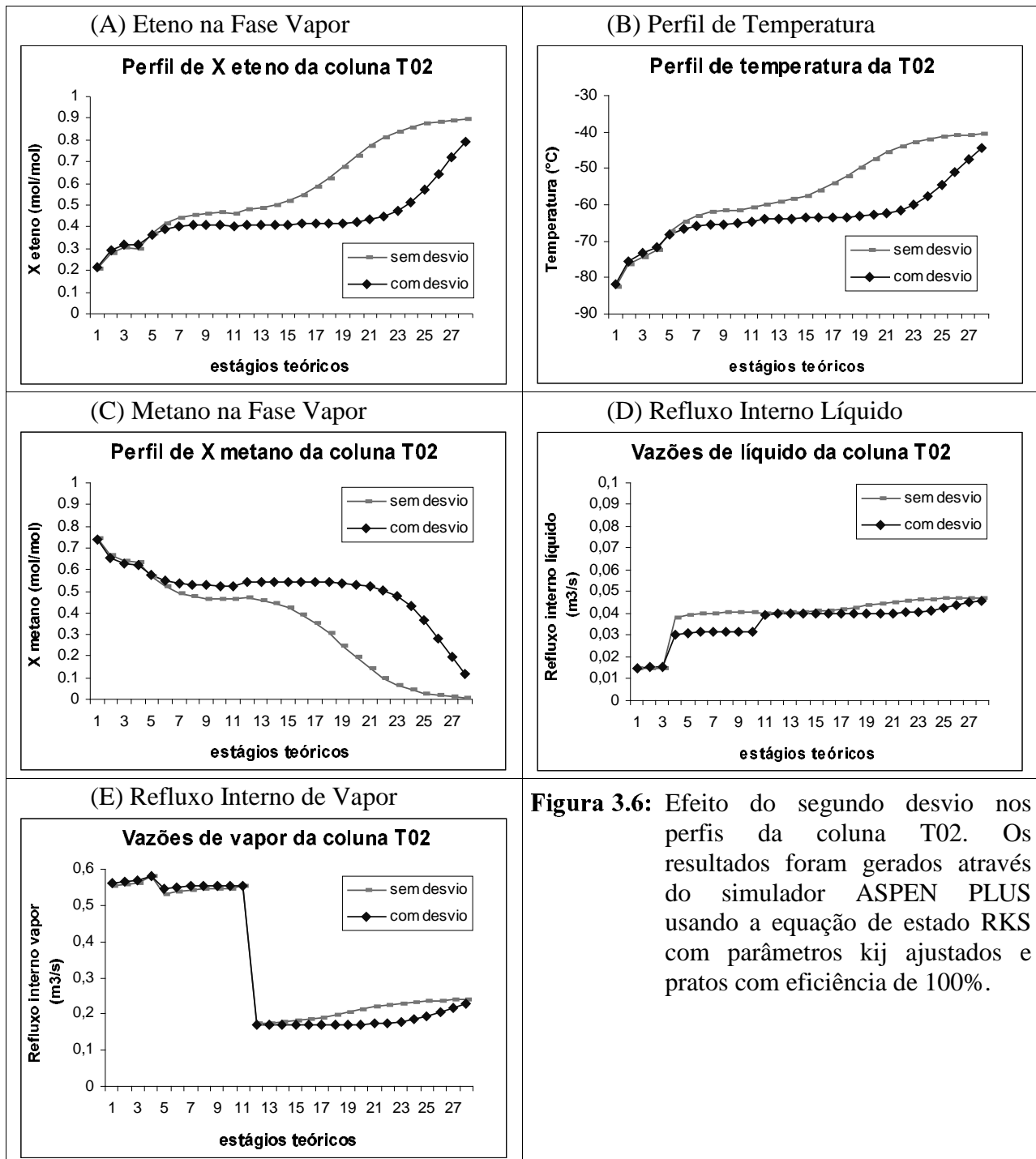


Figura 3.5: Representação do modelo utilizado na simulação da coluna T02 isolada do resto da unidade, que analisa a influência do desvio 2.

Observe que a variação da diferença de temperatura entre o topo e fundo diminui de 43,2 °C sem o desvio para 40,5 °C com o desvio, indicando uma menor eficiência da seção de pratos. Observe que tanto a vazão de topo como de fundo aumentam, porém o teor de eteno no fundo diminui, quando se utiliza o desvio 2, acompanhada por uma diminuição da vazão de eteno no fundo. Isto implica em um aumento na perda de eteno no topo, que é reciclado para a coluna pela corrente de fundo da T04, aumentando a recirculação na unidade.

Nos perfis de temperatura e de composição mostrados na Figura 3.6 é fácil observar que o desvio fez com que aparecesse um patamar constante entre os pratos teóricos 8 e 20, isto é, esta seção da coluna possui uma eficiência muito baixa, o que faz com que um maior teor de eteno apareça no topo.

Analisando-se a hidráulica da coluna, o desvio 2 é capaz de diminuir o refluxo líquido entre o prato teórico 4 e 11, e também diminuir o refluxo vapor no fundo da coluna. Então o desvio 2 tem a capacidade de desafogar a situação hidráulica da T02, mas compromete consideravelmente a eficiência da coluna, acabando por elevar a perda de eteno no sistema.



Com o objetivo de compreender melhor o efeito do desvio e a variação da composição, analisou-se o comportamento do perfil de temperatura da coluna frente a um aumento do teor de metano na alimentação do prato teórico 4 e do prato teórico 11. As duas próximas figuras ilustram os resultados obtidos.

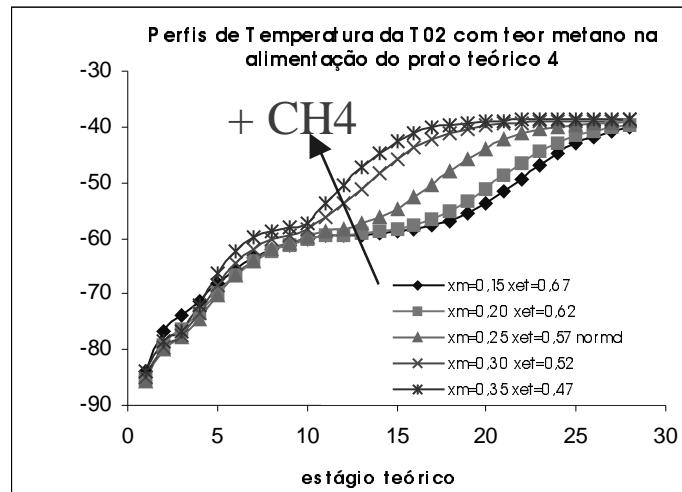


Figura 3.7: Influência do aumento do teor de metano na alimentação próxima ao topo da coluna T02.

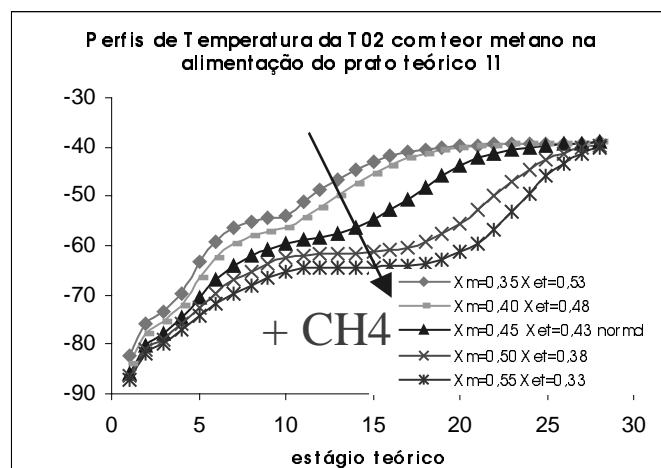


Figura 3.8: Influência do aumento do teor de metano na alimentação média da coluna T02.

Como se percebe, o aumento de metano provoca comportamentos opostos quando acontece na alimentação do topo ou intermediária. Como as correntes de topo desempenham papel de refluxo de condensado da coluna, o aumento do teor de metano nestas alimentações (pratos 1 e 4), representam correntes mais pobres em eteno, que, conforme o estudo termodinâmico (figura 3.2), representam uma menor injeção de frio no topo. Com isto a coluna tem o perfil deslocado para cima (figura 3.7), especificando melhor o fundo, sem o aparecimento do patamar intermediário.

Já quando o aumento de metano ocorre na região intermediária da coluna, surge um patamar intermediário de temperatura (figura 3.8), e percebe-se a elevação do teor de metano no produto de fundo. Isto é facilmente explicado pois neste caso o aumento de metano pode ser entendido como um simples caso de aumento de impureza injetada na coluna, que acaba refletindo no produto de fundo da coluna, que no caso da simulação, possui carga térmica do refeedor HX02 constante.

Assim como observado anteriormente, o aparecimento do patamar intermediário é acompanhado por uma melhor situação hidráulica da unidade, embora isto diminua a eficiência da coluna. A utilização do desvio 2 corresponde à injeção de corrente líquida com fração molar de metano próxima a 0,36 e temperatura de -75°C (que é o teor de metano e a temperatura da corrente injetada no prato 4) numa bandeja que está a aproximadamente -60°C , e com uma fração molar de metano em torno de 0,10 na fase líquida.

Sumarizando, o desvio 2 reduz o perigo de inundação às custas de uma menor recuperação de eteno. Portanto, dado ao alto preço pago pela sua utilização, a estratégia de controle que será proposta não fará uso desse desvio. A seguir será analisada mais atentamente as perdas de eteno que ocorrem na unidade.

3.3.3 Perda de Eteno

As colunas T01 e T02 são as principais responsáveis pelo baixo grau de recuperação de eteno, que está em teor acima do previsto nas correntes leves. Este efeito indesejável é fruto de uma perda na eficiência das seções de fracionamento da unidade na operação atual. O aumento de carga da unidade e a utilização do segundo desvio, são os responsáveis por esta situação como explicado anteriormente. Embora os pontos básicos necessários para se entender as origens da baixa eficiência da unidade já tenham sido apresentados, cabe enfatizá-los, posto que eles constituirão os pilares sobre os quais serão edificadas as nossas estratégias de controle.

Situação da Coluna T01

Analisando-se a coluna T01, verifica-se que o aumento de carga da unidade não é acompanhado pelo aumento de sua utilização, ou seja, a vazão de seu produto de fundo não aumenta proporcionalmente com a carga da unidade.

A carga desta coluna é uma corrente de elevada fração líquida (0,90), alimentada acima do prato superior, assumindo o papel de reciclo da coluna. O aumento da carga da coluna, e conseqüentemente do reciclo, combinada com uma maior vaporização no fundo, provocaria um aumento do reciclo interno, aumentando portanto a capacidade de separação dos pratos. Como esta torre não possui histórico relacionado com problemas de inundação, acredita-se que ela tenha capacidade de operar com uma carga maior, e com um refluxo interno mais elevado. Isto garantiria uma maior produção de C2+ nesta coluna (1^o corte C2+).

Situação da Coluna T02

A parcela do corte C2+ que deveria ter sido processada na coluna T01 acaba desembocando na coluna T02. Como essa coluna não foi dimensionada para processar esse excesso de C2+ na pureza requerida, consegue-se através do desvio 2, às custas da eficiência da separação, evitar que a coluna T02 inunde.

Para entender melhor o que está ocorrendo com as perdas da unidade durante a subida de carga, será efetuado o balanço de massa entre a corrente que chega à unidade (carga total),

e as correntes que a deixam, que são: fundo T01, fundo T02, topo T03 e topo V09. A corrente de reciclo metano-eteno não foi considerada. A subida de carga deu-se em torno de 17 horas da escala, e o desvio 1 permaneceu aberto (5 ton/h) entre 18 e 28 horas do tempo do processo. Para uma melhor análise, foram plotadas as curvas das variações de cada corrente em relação ao seu valor inicial, como ilustra a figura 3.9.

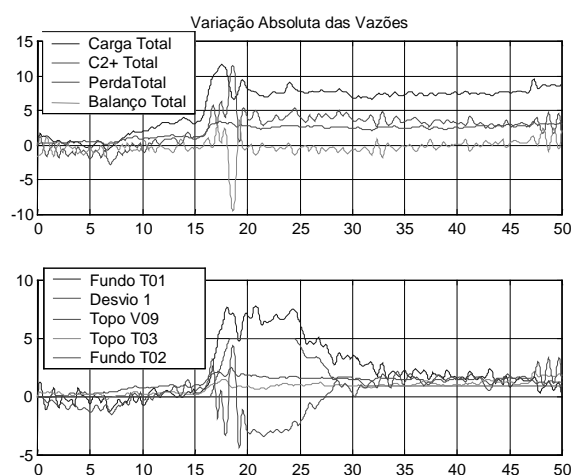


Figura 3.9: Balanço de massa absoluto da unidade durante uma subida de carga. As curvas mostram a variação da vazão da corrente em relação ao seu valor inicial, que corresponde à posição zero. As ordens das legendas seguem a mesma ordem que as curvas estão dispostas. Os dados de planta foram filtrados previamente*.

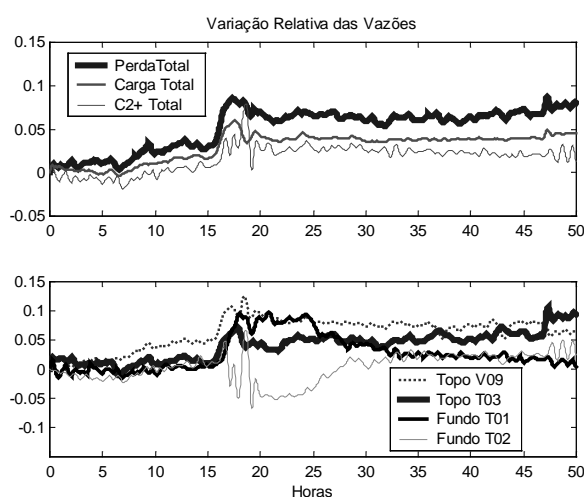


Figura 3.10: Balanço de massa relativo da unidade durante uma subida de carga. As curvas mostram a variação da vazão da corrente em relação ao seu valor inicial, que corresponde a posição zero. Os dados de planta foram filtrados previamente.

* Para todas as curvas das figuras 3.9, 3.10 e 3.11, foi aplicado um filtro de Butterworth, implementado na função `idfilt` do System Identification Toolbox (verificar em MATHWORKS,1999) de segunda ordem, eliminando oscilações com frequências superiores a $1 \times 10^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Percebe-se um crescimento tanto na produção do corte C2+, como nas perdas da unidade. A figura 3.10 mostra a variação relativa, que dá uma melhor idéia da evolução das perdas da unidade, em relação à produção do corte C2+, após a subida de carga. Percebe-se claramente que com o aumento da carga da unidade, houve um aumento bem maior das vazões de perdas da unidade (topo T03 e topo V09), do que da produção de C2+ da unidade (fundo T01 e T02). Durante o período de 18 a 25 horas, no qual o desvio 1 ficou aberto, o produto de fundo da coluna T02 diminuiu, enquanto que o da coluna T01 aumentou.

A figura 3.11 mostra como se comportou o teor de eteno nas correntes de carga e nas correntes que deixam a unidade.

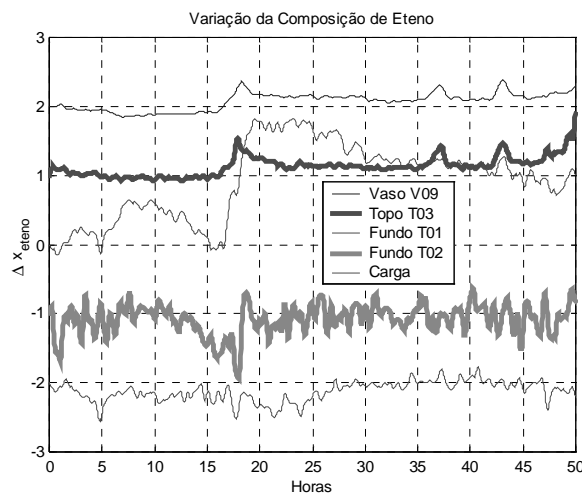


Figura 3.11: Teor de eteno das correntes do balanço de massa da unidade, durante uma subida de carga. Os dados foram filtrados previamente. As escalas foram deslocadas para facilitar a visualização. A ordem das legendas é a mesma das curvas.

De modo geral, o que se percebe mais claramente é um maior teor de eteno no 1º corte C2+, que acredita-se que seja devido a temperatura mais elevada do vaso V04, após a subida de carga. Pode-se observar também um aumento no teor de eteno nas correntes de topo da coluna T03 e vaso V09, ou seja as perdas da unidade.

3.4 Soluções

A solução do problema deve passar por uma estrutura de controle que garanta que um aumento de carga vai causar uma elevação proporcional no produto de fundo da T01, evitando assim que a T02 fique sobrecarregada. Com isto a unidade poderá operar sem que ocorra inundação na T02 ou perda de eficiência da unidade.

3.4.1 Estrutura atual de controle

A estrutura atual está comprometendo a utilização adequada das colunas T01 e T02. A figura 3.12 mostra como se comporta a distribuição de carga entre elas.

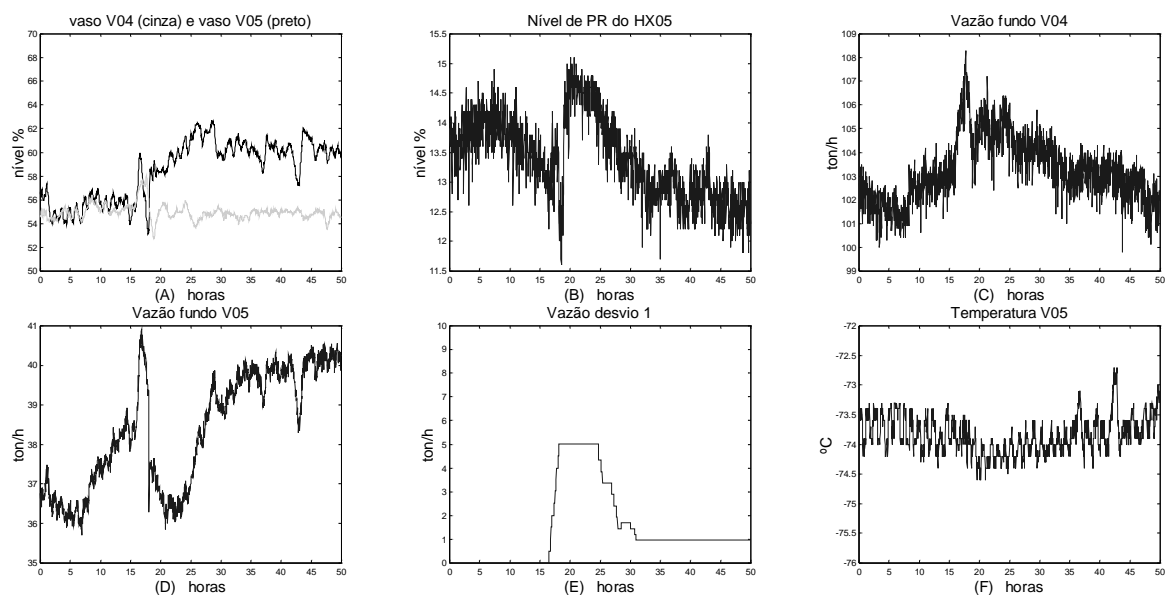


Figura 3.12: Dados de planta relativos à separação nos vasos V04 e V05, durante a subida de carga.

Como o nível do HX05, (figura 3.12 (b)) assume um valor menor do que o inicial (a partir de 30 horas), constata-se que ele resfria menos a corrente da unidade, e condensará menos que o desejável no vaso V04, que provavelmente opera a uma temperatura mais elevada após a subida de carga. Como o vaso V05 opera a uma temperatura quase constante, este vaso é sobrecarregado, condensando o líquido que deveria ter saído pelo fundo do vaso V04. Observe na figura 3.12 (c) que a vazão de fundo do V04 se mantém praticamente inalterada para tempos maiores que 30 horas, enquanto a vazão de fundo do V05 sofre um aumento considerável (figura 3.12 (d)). Isto mostra que a coluna T01, após a subida de carga, com o desvio 1 fechado, passa a ser menos utilizada do que deveria, sobrecarregando a coluna T02. O desvio 1 procura minorar esse efeito redirecionando parte da corrente líquida do vaso V05 para a coluna T01 diminuindo dessa forma a carga da T02.

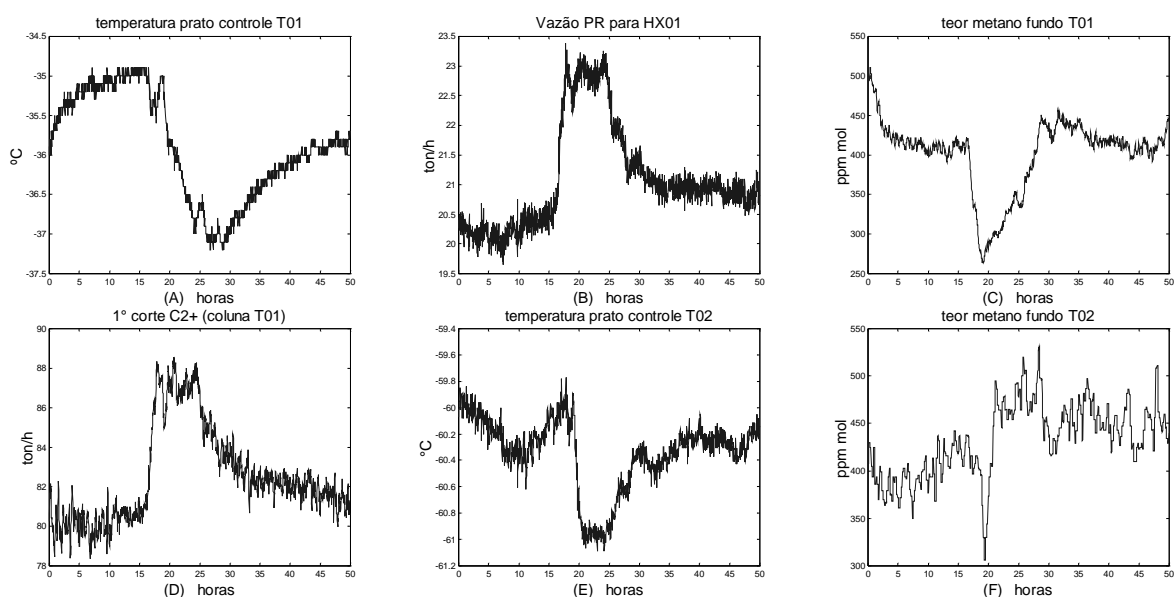


Figura 3.13: Tendências relativas às colunas T01 e T02 durante a subida de carga.

Observando na figura 3.13 (a) o comportamento da coluna T01, percebe-se uma queda na temperatura do prato de controle, coincidindo com a abertura do desvio 1. O controlador de temperatura manda sinal para o refervedor HX01 aumentar a troca térmica, aumentando a temperatura da bandeja, o que pode ser visto através do aumento da demanda de vapor de propeno para o reboiler (figura 3.13 (b)). Mas o teor de metano no fundo da coluna neste momento passa por um mínimo (figura 3.13 (c)), o que permitiria uma diminuição no calor do reboiler, de modo a aumentar ainda mais a vazão do produto de fundo que está acima da especificação requerida pelo setpoint. Como foi discutida na seção da termodinâmica, um maior teor de eteno na corrente expandida que servirá de carga da T01 representaria uma maior injeção de frio na coluna, porém com mais pureza em eteno. A estrutura de controle atual procura, num primeiro momento, manter constante a temperatura do prato de controle, este setpoint só é corrigido mais tarde pelo sinal enviado pelo controlador do teor de metano no produto de fundo da coluna.

A Figura 3.13 também mostra o que ocorre na T02 durante o aumento de carga. Num primeiro momento ocorre muita evaporação no fundo da coluna, que é observado no teor de metano no fundo que cai bruscamente (figura 3.13 (f), queda próxima a 18 horas), ocorrendo também um aumento na temperatura do prato de controle (figura 3.13 (e), subida próxima a 18 horas). De acordo com a figura 3.12 (b), o nível do HX05 é elevado entre 20 e 25 horas, resfriando mais a corrente que entra no refervedor HX02, promovendo menos evaporação no fundo da coluna T02, de modo que aumente a vazão do corte C2+, permitindo a chegada de mais metano no fundo, que está com teor abaixo do seu setpoint (sobre-especificado). Por fim o metano contamina o fundo, obrigando que o nível do HX05 seja novamente reduzido. Isto faz com que o V04 opere numa temperatura mais alta que a indicada, ocasionando todos os problemas de distribuição de eteno entre as colunas T01 e T02 já mencionados.

Verifica-se que o calor trocado no HX05 tem importância vital na especificação do fundo da coluna T02 e na distribuição do corte C2+ entre as duas desmetanizadoras. Na configuração atual existe um conflito entre esses dois objetivos os quais só poderão ser alcançados simultaneamente através da utilização ou adição de mais um grau de liberdade. A seguir serão apresentadas duas alternativas de inserção de grau de liberdade de tal forma que se consiga controlar de maneira independente o teor de metano no fundo da T02 e a temperatura do vaso V04.

3.4.2 Proposta de estruturas de controle

Com o objetivo de inserir mais um grau de liberdade no sistema, foram propostas duas estruturas de controle. Estas estruturas deviam ser de fácil implantação e de baixo custo.

Estrutura 1 – com alteração de alinhamento

Esta estrutura propõe a troca de alinhamento da unidade, de modo que o trocador HX04 seja posicionado após o HX02, controlando então a temperatura do vaso V04. Seria também implantado um alinhamento que desviaria parte do gás de carga do HX02. O controle da especificação de metano do fundo da T02 manipularia a vazão desviada do refervedor, aumentando ou diminuindo o calor injetado neste equipamento (fig. 3.14 (a)).

Estrutura 2 – sem alteração de alinhamento

Esta estrutura sugere o uso do desvio 1 para manipular a distribuição de carga entre as colunas T01 e T02, retornando para a primeira coluna o excesso de carga que sobrecarregaria a segunda. A especificação do produto de fundo da coluna T02 continuaria sendo controlada pela carga térmica do HX05. A Fig. 3.14 (b) ilustra melhor esta opção. Aqui uma determinada relação R , ($R=FB/FA$), entre as cargas das duas colunas é controlada através da manipulação da vazão do desvio 1. No caso de uma subida de carga da unidade, quando a sua composição é mantida constante, a simples manutenção do R num valor constante, já é capaz de manter inalterada a distribuição de carga entre as colunas T01 e T02.

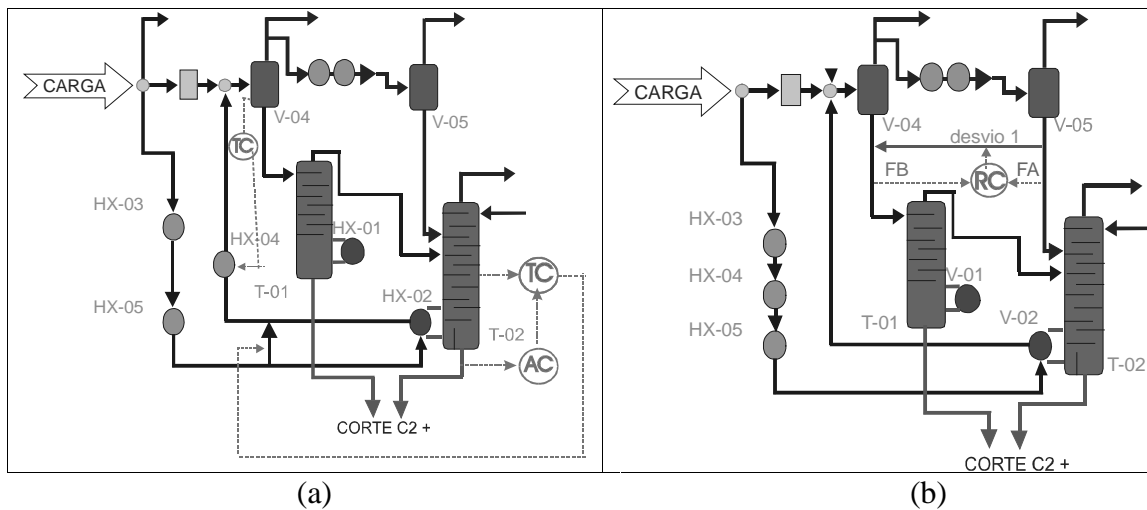


Figura 3.14: Representação esquemática da estrutura 1 (a) e da estrutura 2 (b). No desenho FA e FB são as vazões da carga principal das colunas T02 e T01, respectivamente, que serão usadas no cálculo de R ($R=FB/FA$).

No capítulo 7 estas estruturas de controle serão postas à prova, procurando realizar uma comparação entre os desempenhos obtidos por cada uma delas, no que concerne a situação hidráulica das colunas, e a produção do corte C2+. Também serão testadas estruturas que variem o valor de R , permitindo correções referentes a distúrbios, como perturbações na composição da carga da unidade.

As próximas etapas do estudo consistem na modelagem da simulação estática e dinâmica da unidade, para que se consiga reproduzir os comportamentos observados na planta real, sendo útil na avaliação do desempenho das soluções de controle propostas, além de ampliar o conhecimento da unidade.

Capítulo 4

Simulação Estática e Modelagem Termodinâmica

A simulação estática da unidade é um passo importante que servirá tanto para melhorar o entendimento da planta, quanto para iniciar a simulação dinâmica, visto que o modelo estático é o ponto de partida utilizado na geração do modelo dinâmico.

Neste capítulo serão descritos inicialmente os passos básicos que são percorridos para se desenvolver uma simulação estática. Num segundo momento será detalhada a definição da modelagem termodinâmica.

Para se executar a simulação foram utilizados dois simuladores comerciais muito populares. Pôde-se, então, fazer uma comparação entre eles, que será apresentada no final do capítulo. Os dois simuladores utilizados foram:

- ASPEN PLUS, versão 10.1-0, maiores informações em (AspenTech, 1999)
- HYSYS PROCESS, versão 1.5, maiores informações em (Hyprotech, 1999)

Foram simulados, em ambos os casos, a mesma carga de processamento, sob as mesmas condições operacionais.

4.1 Passos básicos da simulação estática

Serão descritos, de forma sucinta, quais os passos básicos que devem ser seguidos na montagem de uma simulação estática, salientando que eles são os mesmos para qualquer um dos simuladores utilizados.

4.1.1 Seleção dos componentes

A primeira etapa consiste na escolha dos componentes presentes na simulação. No caso estudado, havia dados de análise em laboratório da carga da unidade, de algumas correntes intermediárias e dos produtos. Optou-se então, numa simulação inicial, pela utilização de todos os componentes encontrados nas análises. Após a obtenção de uma simulação inicial da planta, com resultados semelhantes aos da planta real, decidiu-se fazer a redução do número de componentes.

O objetivo desta redução é diminuir o esforço computacional de cada simulação, porém sem comprometer o modelo estático. Foram seguidos dois passos na simplificação dos componentes:

1-Agrupar componentes semelhantes: representá-los pelo componente que preferencialmente: 1) estivesse em maior quantidade 2) apresentasse características médias entre os compostos agrupados.

2-Executar nova simulação: verifica-se na análise dos novos resultados da simulação, se houve grandes alterações em relação ao caso original e se as simplificações não estariam comprometendo o resultado da simulação. Foram checadas as vazões e composições das correntes de topo e fundo das colunas, além de correntes importantes intermediárias e finais do processo.

Foram tomados cuidados maiores com relação a componentes os quais apresentassem um equilíbrio líquido-vapor mais difícil de se prever, devido a estarem próximos de suas condições críticas (H_2, CH_4), ou por apresentarem características difíceis de serem previstas (compostos assimétricos e altamente polares). No final das simplificações chegou-se a somente 7 componentes. A tabela abaixo mostra quais componentes foram utilizados:

Tabela 4.1: Componentes utilizados nas simulações estacionárias.

Componentes utilizados	Composição Molar (fração molar)
1) hidrogênio	0,17
2) metano	0,30
3) eteno	0,35
4) acetileno	0,01
5) etano	0,06
6) propeno	0,08
7) 1-buteno	0,03

4.1.2 Modelagem Termodinâmica

A escolha do modelo termodinâmico utilizado para representar o sistema é uma parte fundamental no desenvolvimento de uma simulação confiável. Esta etapa assume um papel ainda mais importante no caso de uma unidade desmetanizadora, que realiza uma separação

envolvendo componentes com propriedades físicas muito próximas, produzindo correntes de elevada pureza. Outra característica desta unidade é o fato de que alguns componentes encontram-se em condições próximas aos seus pontos críticos, situação na qual a predição do equilíbrio líquido-vapor é dificultada.

Dois aspectos que foram estudados com maior profundidade serão detalhados mais adiante, são eles:

- Modelo termodinâmico: num primeiro momento foram consultados os manuais dos simuladores estáticos, que indicaram 6 equações diferentes para o caso estudado (unidade desmetanizadora, gases leves petroquímicos), que serão citados depois. Não se percebeu grande diferença entre elas.
- Parâmetros de interação binária: inicialmente se utilizaram os valores contidos nas bibliotecas dos próprios simuladores, posteriormente será demonstrado um estudo que identifica quais os pares de componentes mais influentes para o nosso caso e quão sensível é a simulação em relação ao valor do parâmetro de interação binária em questão.

4.1.3 Montagem do fluxograma de processo

Esta etapa consiste em representar o processo, colocando os equipamentos a serem simulados, e ligando-os pelas correntes, tal como é na planta real. Nesta etapa são necessários conhecimentos das condições operacionais da planta, tais como temperaturas de correntes, pressões de equipamentos, cargas térmicas de trocadores, perda de cargas de equipamentos. Características de projeto, tais como tipo de trocadores de calor, tipos de colunas (pratos ou recheio), número de pratos, posições de alimentações, também são necessários. Quanto mais detalhes do processo forem conhecidos, melhor e mais confiável será o resultado da simulação da unidade.

4.1.4 Convergência da simulação do processo

A convergência do fluxograma do processo é uma etapa que pode ser extremamente difícil. As grandes diferenças entre os simuladores estão relacionadas com este item. As ferramentas disponíveis e os métodos matemáticos empregados determinam o esforço computacional compreendido para se obter a convergência de um caso, sendo que algumas vezes definem se a própria convergência será possível ou não. Com relação ao caso estudado em si, alguns itens determinam a sua complexidade:

- Presença de colunas:

Cada simulador apresenta seu próprio método de convergência de colunas. O grau de dificuldade é maior para colunas que executam separações de componentes com pontos de ebulição muito próximos, ou que tenham especificações muito rígidas.

- Reciclos mássicos e energéticos:

Da mesma forma como a resolução de colunas, cada simulador tem seu próprio meio para resolver estes laços (loops). A dificuldade será maior, quanto maior o número de enlacs, e mais complexos eles forem.

A unidade desmetanizadora estudada apresenta grande número de reciclos mássicos e energéticos, além de possuir quatro colunas de fracionamento, isto possibilitou que se diferenciasses bem as características dos dois simuladores.

4.1.5 Análise dos resultados e comparação com dados reais

Esta etapa consiste no ajuste da nossa simulação para melhor representar a planta real. Após a obtenção de uma simulação convergida, procede-se a comparação dos resultados obtidos com os dados de planta disponível.

A obtenção de dado de planta confiáveis é um ponto crítico nesta etapa, devido principalmente a dois fatores. O primeiro consiste em se obter valores das condições do processo (temperatura, pressão, composição, vazão, etc.) que sejam representativos da situação estática da planta, não afetados por transientes que possam estar ocorrendo. Quanto a isto, também deve-se ter o cuidado para que todos os dados coletados sejam relativos à mesma condição operacional.

Outro detalhe que deve ser verificado é a qualidade das medidas efetuadas. Este ponto se refere a calibração adequada dos instrumentos de medida, sensibilidade na região de operação, precisão, ou mesmo outros problemas como configuração inadequada do SDCD (onde os dados podem estar sendo coletados) e leitura executada em instrumentos em fim de escala (full range).

Após a obtenção de um bom conjunto de dados reais, inicia-se a comparação com os resultados da simulação. Procede-se então o ajuste das condições operacionais, especificações e características de projetos dos equipamentos, para que o modelo estacionário consiga reproduzir melhor os valores da planta. Os ajustes podem também implicar na revisão da modelagem termodinâmica, como foi o caso desta unidade desmetanizadora.

O grande desafio no desenvolvimento de uma boa simulação estática, consiste nesta etapa final, que é a obtenção de um bom conjunto de dados, e o ajuste do modelo estático. Nesta etapa o engenheiro utiliza profundamente seus conhecimentos de engenharia e seu sentimento, para avaliar se um resultado suficientemente bom já foi atingido para os seus propósitos.

4.2 Análise do Modelo Termodinâmico

Durante o desenvolvimento da modelagem estática, foram realizados vários testes para observar a importância da escolha do modelo termodinâmico mais adequado e as diferenças

existentes entre eles. O estudo se deu basicamente na influência sobre o perfil de temperatura da coluna T02, visto que ela é o equipamento crítico da unidade, com a utilização do desvio 2.

Os resultados obtidos indicaram que seria interessante um levantamento de dados mais específicos relativos ao equilíbrio líquido-vapor da unidade para definir o melhor modelo termodinâmico, mas isto foge do escopo deste trabalho. A simulação estacionária desta coluna isolada do resto da unidade, já utilizada na seção 3.3.2, foi elaborada no simulador Aspen Plus para se avaliar a importância da modelagem termodinâmica na simulação, procurando identificar quais seriam os fatores mais importantes.

4.2.1 Modelo Termodinâmico

A primeira comparação foi realizada com várias modelagens termodinâmicas sugeridas pelos manuais dos dois simuladores utilizados. Segundo eles, as equações de estados mais indicadas para se definir as propriedades termodinâmicas das fases líquida e vapor de hidrocarbonetos leves em aplicações de alta pressão são:

PR: equação cúbica de Peng-Robinson, utilizando-se parâmetros binários (kij) para cálculos mais precisos do equilíbrio líquido-vapor.

PR-BM: equação cúbica de Peng-Robinson com a modificação de Boston-Mathias (disponível somente no Aspen Plus), com parâmetros binários (kij).

RKS: equação cúbica de Redlich-Kwong-Soave, com parâmetros binários (kij). Desempenho comparável ao da equação de PR.

RKS -BM: equação cúbica de Redlich-Kwong-Soave com a modificação de Boston-Mathias (disponível somente no Aspen Plus, com parâmetros binários (kij). Desempenho comparável ao da equação de PR-BM.

LK-Plock: equação do tipo do virial baseada na equação de estado de Lee-Kesler-Plöcker, com parâmetros binários (kij). Não é tão indicada como as equações do tipo PR e RKS.

BWR-LS: é a generalização da equação de estado de BWR-Lee-Starling baseada na equação de estado de Benedict-Webb-Rubindo de tipo do virial, com parâmetros binários (kij).

Os pares de interação binária são provenientes da própria biblioteca do Aspen. O resultado da simulação utilizando estes modelos termodinâmicos está mostrado na figura 4.1.

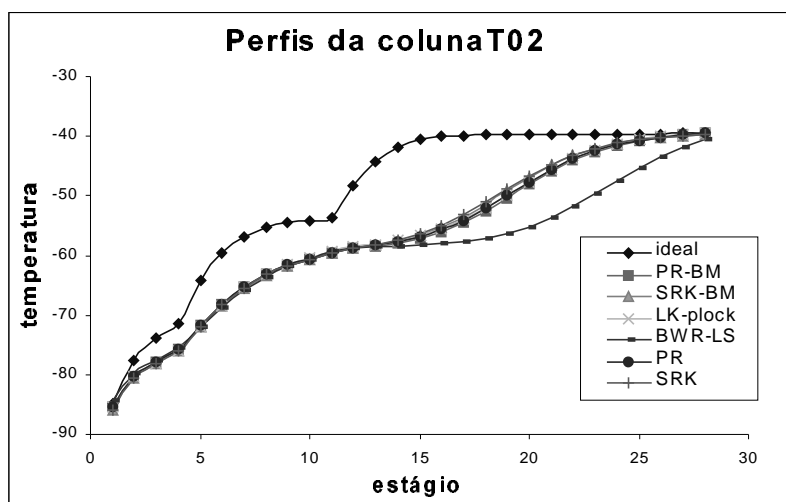


Figura 4.1: Perfil de temperatura da coluna T02, predito por diferentes modelos termodinâmicos.

O perfil gerado considerando-se a modelagem pela Lei dos Gases Ideais também foi plotado, para servir de referência. Como se pode perceber, os únicos modelos que apresentam uma diferença considerável são o BWR-LS e o Ideal, visto que os restantes possuem curvas quase superpostas.

Observe também que as maiores diferenças entre a predição de BWR-LS e as demais (excetuando-se o caso ideal) estão situadas na região da coluna que vai do prato teórico 17 ao 26, quando a diferença de temperatura entre as duas predições atinge quase 8 °C (no estágio 22).

Acredita-se que isto pode ser explicado pelo fato de que o metano presente nesta coluna esteja próximo ao seu ponto crítico ($T_c = -83 \text{ °C}$ e $P_c = 45 \text{ Kgf/cm}^2$), visto que esta é a região da coluna na qual as temperaturas são mais elevadas ($P_{\text{coluna}} = 12 \text{ Kgf/cm}^2$ e $T_{\text{estágio}}$ acima de -60 °C). Isto se deve à dificuldade que as equações de estado termodinâmica têm para prever o equilíbrio líquido-vapor quando o componente está próximo do seu ponto crítico. O fato de que as temperaturas preditas, pelos vários modelos, para os pratos 27 e 28 começam a ser novamente muito semelhantes entre si, decorre de que, nesta região final da coluna, a percentagem do metano diminui muito.

Os perfis obtidos levam à conclusão de que os modelos termodinâmicos usados, por si só, não influenciam consideravelmente o resultado da simulação, com exceção do BWR-LS e do Ideal, o qual é muito simplificado para este caso.

4.2.2 Parâmetros Binários

Num segundo momento foi verificado qual seria a importância de cada par de interação binária, ou seja, os parâmetros k_{ij} . Nesta avaliação verificou-se o perfil de temperatura da coluna T02 frente a mudanças nos k_{ij} de diferentes pares binários, com o objetivo de identificar quais seriam os pares determinantes nesta coluna.

A figura 4.2 mostra a simulação da coluna T02 utilizando-se o modelo SRK-BM para duas situações distintas: (a) utilizando-se os pares kij contidos na biblioteca do Aspen Plus (veja a tabela 4.2); (b) os pares kij foram considerados iguais a zero.

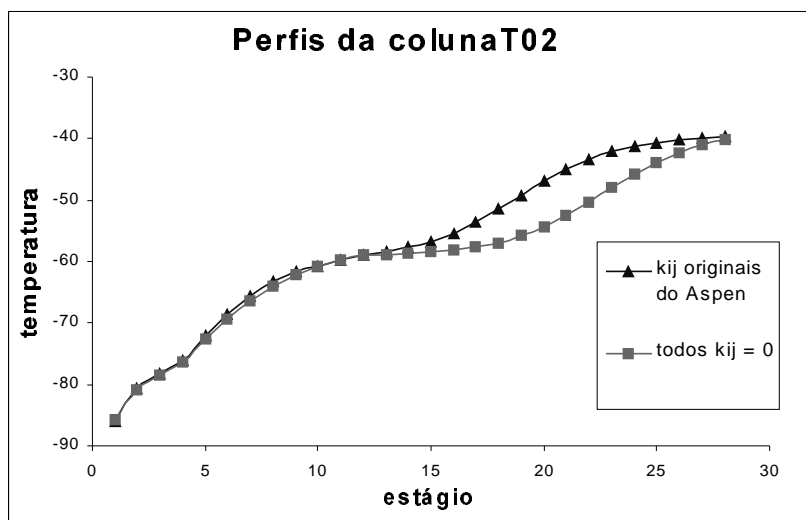


Figura 4.2: Perfis de temperatura da coluna T02, quando são utilizados os kij contidos na biblioteca do Aspen, em comparação com o caso no qual todos kij são nulos.

Como se pode perceber, novamente os parâmetros kij têm uma importância muito grande na simulação desta coluna entre os estágio 16 e 26. Os kij utilizados pelo Aspen estão listados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores dos Parâmetros kij para os pares de componentes, segundo a biblioteca do simulador Aspen Plus. As células vazias correspondem a kij iguais a zero.

	hidrogênio	metano	eteno	acetileno	etano	propeno	1-buteno
hidrogênio		-0,0222	-0,0681		-0,1667	-0,3233	
metano	-0,0222		0,0189		-0,0078	0,0289	
eteno	-0,0681	0,0189		0,0596	0,0100		
acetileno			0,0596				
etano	-0,1667	-0,0078	0,0100			0,0026	
propeno	-0,3233	0,0289			0,0026		-0,0037
1-buteno						-0,0037	

O passo seguinte foi a definição de quais dos pares kij têm importância neste caso específico. Para isto foram realizadas várias simulações, cada uma assumindo que um par kij descrito na tabela seria considerado como nulo. O resultado obtido está na figura 4.3, que traz como referência duas curvas: o perfil quando todos os kij são considerados nulos (a curva inferior), e o perfil quando são utilizados todos os valores de kij do Aspen Plus. As demais curvas são relativas aos perfis da coluna T02 quando apenas um dos parâmetros kij passa a ser considerado nulo. Como se pode perceber, com exceção do caso quando o kij metano-eteno é assumido zero, todos os demais pares de kij não apresentam diferenças sensíveis em relação a curva que corresponde ao uso de todos os kij do Aspen Plus (curvas superiores superpostas). Por uma questão de facilidade de visualização, não foram plotados os perfis correspondentes a

todos os parâmetros binários, por se situarem na mesma região. Verifica-se que considerar o k_{ij} do metano-eteno nulo tem quase o mesmo efeito do que considerar todos os demais k_{ij} nulos.

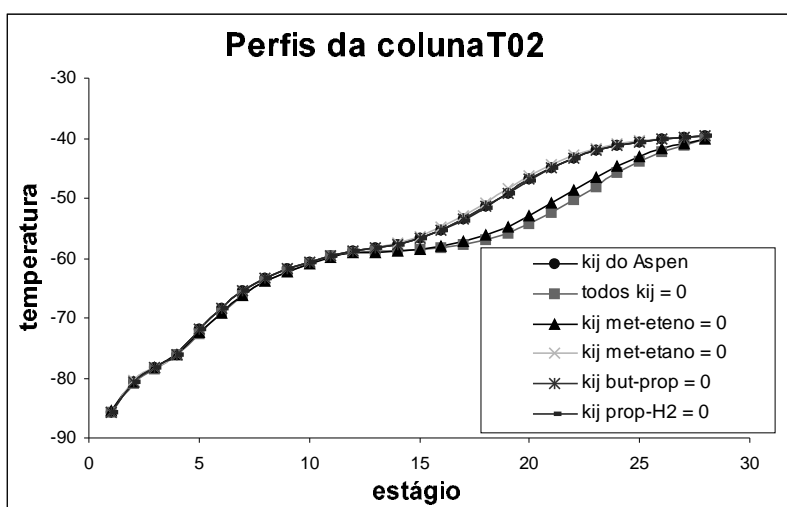


Figura 4.3: Influência de cada par k_{ij} no perfil de temperatura da coluna T02.

Esta conclusão é explicada pelo fato de que esta coluna é constituída basicamente de metano (32 % mol da carga) e eteno (54 % mol da carga), além do fato do metano estar sob condições de operações próximas ao seu ponto crítico.

O próximo passo consistiu na verificação da sensibilidade do perfil de temperatura com relação ao valor do k_{ij} metano-eteno. Isto é importante para se avaliar quanto um erro no valor deste k_{ij} pode prejudicar o resultado da simulação.

4.2.3 Parâmetro Binário metano-eteno

O valor do k_{ij} para o par metano-eteno varia consideravelmente entre a biblioteca do Aspen Plus e a biblioteca do Hysis Process.

$$k_{ij} = 0,0189 \quad \text{Aspen Plus}$$

$$k_{ij} = 0,0017 \quad \text{Hysis Process}$$

Procedeu-se então uma avaliação para se verificar a importância deste valor no perfil de temperatura da coluna T02. A figura 4.4 mostra como o parâmetro k_{ij} metano-eteno afeta o perfil de temperatura.

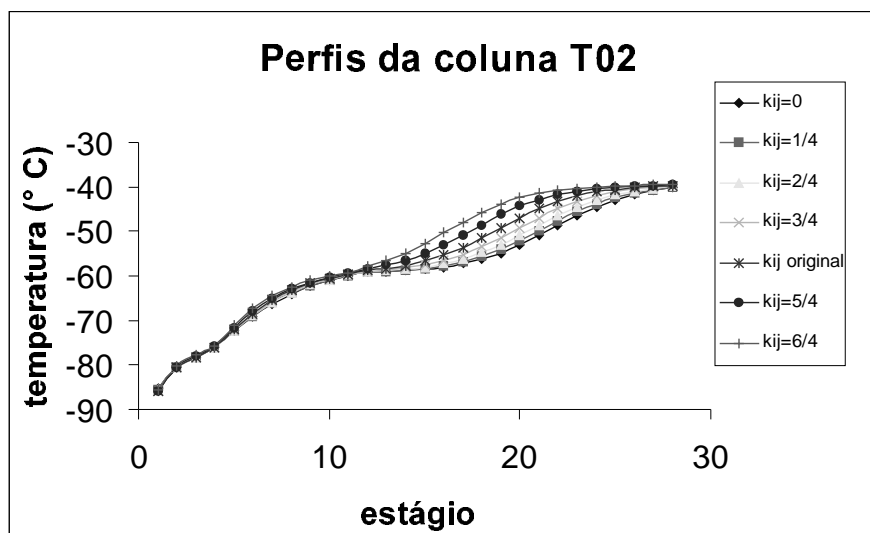


Figura 4.4: Influência do valor do kij metano-eteno nos perfis simulados de temperatura da coluna T02. O kij original se refere ao valor sugerido na biblioteca do Aspen Plus. As frações contidas na legenda das demais curvas correspondem ao valor que multiplicou o kij original, gerando o valor de kij utilizado na curva correspondente.

Observando-se a figura 4.4, verifica-se que um dos pratos que sofrem bastante efeito com o valor do kij é o prato teórico 19. Avaliou-se, então, a sensibilidade da temperatura deste prato quanto ao valor do kij para o par metano-eteno, conforme expressa a figura 4.5.

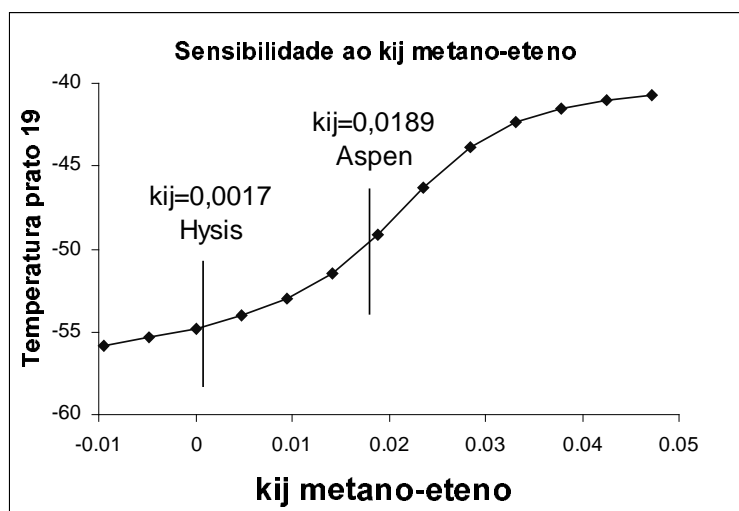


Figura 4.5: Curva da variação da temperatura no prato 19 com valor do kij metano-eteno. Estão indicados os valores do Aspen Plus e do Hysys Process.

Como se pode perceber a temperatura simulada do prato 19 apresenta grande sensibilidade com o valor de kij para o par metano-eteno. A simples escolha do valor do Aspen Plus, ou do Hysys Process representa uma diferença de 5 °C na temperatura simulada do prato. O valor de kij indicado pelo Aspen Plus, de modo especial, se encontra na região mais sensível da curva, mostrando que um bom ajuste deste parâmetro é muito importante.

4.2.4 Referências da Literatura

Após realizar-se esta análise, foram procurados publicações que pudessem auxiliar na definição do melhor valor para o parâmetro de interação binária do par metano-eteno a ser utilizado na simulação. Nos artigos (Urlic et al., 1991) e (Gros et al., 1997) foram apresentados trabalhos sistematizando o ajuste de parâmetros k_{ij} em um trem de fracionamento de uma mistura de hidrogênio, metano, eteno, etano e outros hidrocarbonetos leves. O procedimento é aplicado a uma planta industrial de etileno, contendo quatro colunas críticas, uma superfracionadora eteno-etano, uma superfracionadora propeno-propano, um coluna desmetanizadora e uma coluna desetanizadora.

O trabalho inicialmente se dispõe a identificar quais as colunas críticas da unidade, que necessitariam um ajuste mais fino dos parâmetros k_{ij} , segundo o critério:

- i. Elevado consumo de utilidades.
- ii. Elevado número de estágios para efetuar a separação
- iii. Especificação do produto de fundo ou do destilado diretamente ligada a produtos de alta pureza
- iv. Baixa volatilidade relativa entre os componentes chave leve e chave pesado.
- v. Diferença acentuada entre as vazões de produto de fundo e do destilado.

A coluna desmetanizadora estudada no trabalho em questão apresentava-se como um equipamento crítico devido principalmente ao critério (iii). O parâmetro identificado como o crítico foi justamente o relativo ao par metano-eteno, concordando com o observado na seção anterior. Os artigos citados sugeriram que o valor do k_{ij} fosse definido em função da temperatura (T em Kelvin), segundo a equação (4.1):

$$k_{ij} = 0,054 + 0.075 * \ln(T / 248) \quad (4.1)$$

Retornando a unidade desmetanizadora estudada nesta dissertação, o k_{ij} metano-eteno utilizado na modelagem da coluna T02 deveria ter diferentes valores, dependendo da região da coluna. Para se ter uma idéia, o valor do k_{ij} no topo da coluna T02 corresponderia a 0,034, enquanto que o valor utilizado no fundo seria de 0,049. Valores estes bem diferentes dos sugeridos pelo Aspen Plus e principalmente pelo Hysys Process, tamanha diferença pode ser explicada pelo fato de que a coluna desmetanizadora estudada no artigo opera numa faixa de 31 kgf/cm^2 , muito superior do caso estudado nesta dissertação (13 kgf/cm^2).

Maiores valores de k_{ij} , levam a uma maior volatilidade relativa entre os componentes em questão, ou seja, representam uma maior facilidade de separação. Para o caso específico da coluna T02, observando-se ainda as figuras 4.2 e 4.4, percebe-se que maiores valores do k_{ij} metano-eteno, provocam uma diminuição do patamar intermediário de temperatura desta coluna (entre os pratos 9 e 15), patamar este que é evidenciado na planta real, e que deve ser

reproduzido na simulação. Então não parece apropriada a utilização dos valores calculados pela equação sugerida no artigo.

Sabendo-se da necessidade de uma análise mais profunda do equilíbrio líquido-vapor desta coluna, porém consciente de que este estudo foge ao escopo do trabalho, decidiu-se utilizar um valor intermediário entre os encontrados na biblioteca dos dois simuladores. O valor do kij metano-eteno que passou a ser utilizado na simulação foi 0,00945

4.3 Comparação entre simulações estacionárias do Aspen Plus e do Hysys Process

Para se ter uma comparação dos resultados obtidos com o simulador Aspen Plus e Hysys Process, decidiu-se simular um caso idêntico em ambos simuladores. Foram utilizadas as mesmas cargas da unidade, e as mesmas condições operacionais (perda de carga em equipamentos, temperatura de saída de trocadores, por exemplo) e características de projetos nos diversos equipamentos (número de pratos de colunas, tipos de trocadores, etc.). A tabela 4.3 mostra os valores dos kij utilizados. Em ambos os casos foram usados os valores de kij sugeridos pelo Hysys Process, com exceção do par metano-eteno, cujo o valor foi o médio entre os valores sugeridos pelo Aspen Plus e pelo Hysys Process. Optou-se pela utilização dos kij do Hysys devido esta biblioteca deste simulador dispor de mais pares kij, para os componentes utilizados na simulação. Outro fator que pesou nesta escolha foram informações obtidas junto à assistência técnica do Hysys Process, que informou que um dos pontos fortes do seu produto se relaciona com a qualidade do ajuste dos parâmetros de interação binária.

Tabela 4.3: Valores dos Parâmetros kij utilizados nas simulações estacionárias comparativas entre o Aspen Plus e o Hysys Process.

	hidrogênio	metano	eteno	acetileno	etano	propeno	1-buteno
hidrogênio		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
metano	0,0000		0,0010	0,0094	0,0030	0,0057	0,0114
eteno	0,0000	0,0010		0,0596	0,0017	-0,4199	0,0084
acetileno	0,0000	0,0094	0,0596		0,0123	0,0023	0,0059
etano	0,0000	0,0030	0,0017	0,0123		0,0006	0,0038
propeno	0,0000	0,0057	-0,4199	0,0023	0,0006		-0,0027
1-buteno	0,0000	0,0114	0,0084	0,0059	0,0038	-0,0027	

A composição da carga é a mesma nos dois casos e corresponde à indicada na tabela 4.1. A tabela 4.4 mostra a comparação entre as vazões das correntes de produto obtidas nas duas simulações. Como se pode perceber os resultados concordam de maneira bastante satisfatória. As maiores discrepâncias estão relacionadas com a coluna T04, que tem como produto de topo o metano AP e parte do produto de fundo constitui o reciclo metano-eteno.

Tabela 4.4: Corrente de carga e correntes que deixam a unidade.

Correntes		Aspen Plus	Hysys Process	Diferença (%)
Carga da unidade	ton/h	195,70	195,70	0,00
1 ^o corte C2+	ton/h	86,60	86,40	0,23
2 ^o corte C2+	ton/h	57,80	57,60	0,35
Corrente hidrogênio	ton/h	4,20	4,20	0,00
Metano MP	ton/h	17,50	17,20	1,74
Metano AP	ton/h	21,80	22,70	-3,96
Reciclo metano-eteno	ton/h	8,90	9,00	-1,11

A tabela 4.5 mostra os resultados relativos aos vasos de flash da unidade, visto que eles são parte fundamental na distribuição dos componentes e cargas entre as quatro colunas. As composições de fundo e topo expressas se relacionam aos componentes chaves da separação e/ou que tiveram os maiores erros observados entre as duas simulações.

Tabela 4.5: Vasos de flash da unidade.

Equipamentos		Aspen Plus	Hysys Process	Diferença (%)
Vaso V04				
Vazão de topo	ton/h	95,700	95,300	0,4
Vazão de fundo	ton/h	100,000	100,400	-0,4
X eteno topo	fração molar	0,284	0,284	0,0
X metano fundo	fração molar	0,134	0,138	-2,9
Vaso V05				
Vazão de topo	ton/h	43,600	43,400	0,5
Vazão de fundo	ton/h	52,100	51,800	0,6
X eteno topo	fração molar	0,284	0,284	0,0
X metano fundo	fração molar	0,275	0,275	0,0
Vaso V06				
Vazão de topo	ton/h	28,400	28,200	0,7
Vazão de fundo	ton/h	15,200	15,200	0,0
X eteno topo	fração molar	0,045	0,046	-2,2
X metano fundo	fração molar	0,452	0,449	0,7
Vaso V08				
Vazão de topo	ton/h	5,000	5,000	0,0
Vazão de fundo	ton/h	16,600	16,300	1,8
X metano topo	fração molar	0,093	0,096	-3,1
X hidrogênio fundo	fração molar	0,026	0,030	-13,3
Vaso V09				
Vazão de topo	ton/h	21,800	22,700	-4,0
Vazão de fundo	ton/h	6,200	5,500	12,7
X metano topo	fração molar	0,941	0,929	1,3
X eteno fundo	fração molar	0,052	0,074	-29,7

Novamente os resultados dos dois simuladores das correntes de topo e fundo dos vasos tem boa concordância. Foram repetidas as mesmas condições operacionais para todos estes

equipamentos (temperatura e pressão). O vaso V09 é o que mais se diferencia. Este vaso faz o papel de tambor de refluxo de topo da coluna T04.

A tabela 4.6, a seguir, mostra os resultados das simulações das colunas de fracionamento da unidade, novamente as composições de fundo e topo expressas se relacionam aos componentes chaves da separação e/ou que tiveram os maiores erros observados entre as duas simulações.

Tabela 4.6: Colunas de fracionamento da unidade.

Equipamentos		Aspen Plus	Hysys Process	Diferença (%)
Coluna T01				
Vazão de topo	ton/h	21,40	21,10	1,4
Vazão de fundo	ton/h	86,60	86,40	0,2
X eteno topo	fração molar	0,382	0,379	0,8
X metano fundo	fração molar	0,0023	0,0036	-36,1
Coluna T02				
Vazão de topo	ton/h	34,10	34,70	-1,7
Vazão de fundo	ton/h	57,80	57,50	0,5
X eteno topo	fração molar	0,211	0,217	-2,8
X metano fundo	fração molar	0,0015	0,0019	-21,1
Coluna T03				
Vazão de topo	ton/h	21,70	21,40	1,4
Vazão de fundo	ton/h	9,10	8,90	2,2
X hidrogênio topo	fração molar	0,547	0,547	0,0
X metano fundo	fração molar	0,705	0,695	1,4
Coluna T04				
Vazão de topo	ton/h	28,10	28,20	-0,4
Vazão de fundo	ton/h	34,10	34,60	-1,4
X metano fundo	fração molar	0,942	0,928	1,5
X eteno fundo	fração molar	0,568	0,574	-1,0

Os resultados das colunas são novamente bastante concordantes. Os maiores erros estão relacionados com o teor de metano no fundo das colunas T01 e T02, o que é bastante coerente, visto que estas colunas são altamente especificadas em relação ao teor de metano. Para se ter uma idéia da concordância dos perfis das colunas, a figura 4.6 mostra os perfis de temperatura das quatro colunas simuladas, com a utilização de uma eficiência global de 60 %.

Como se pode perceber, os resultados entre os dois simuladores são muito semelhantes. Acredita-se que as pequenas diferenças entre eles sejam referentes aos critérios de parada dos métodos numéricos, combinado com o tipo de escalonamento usado nas variáveis.

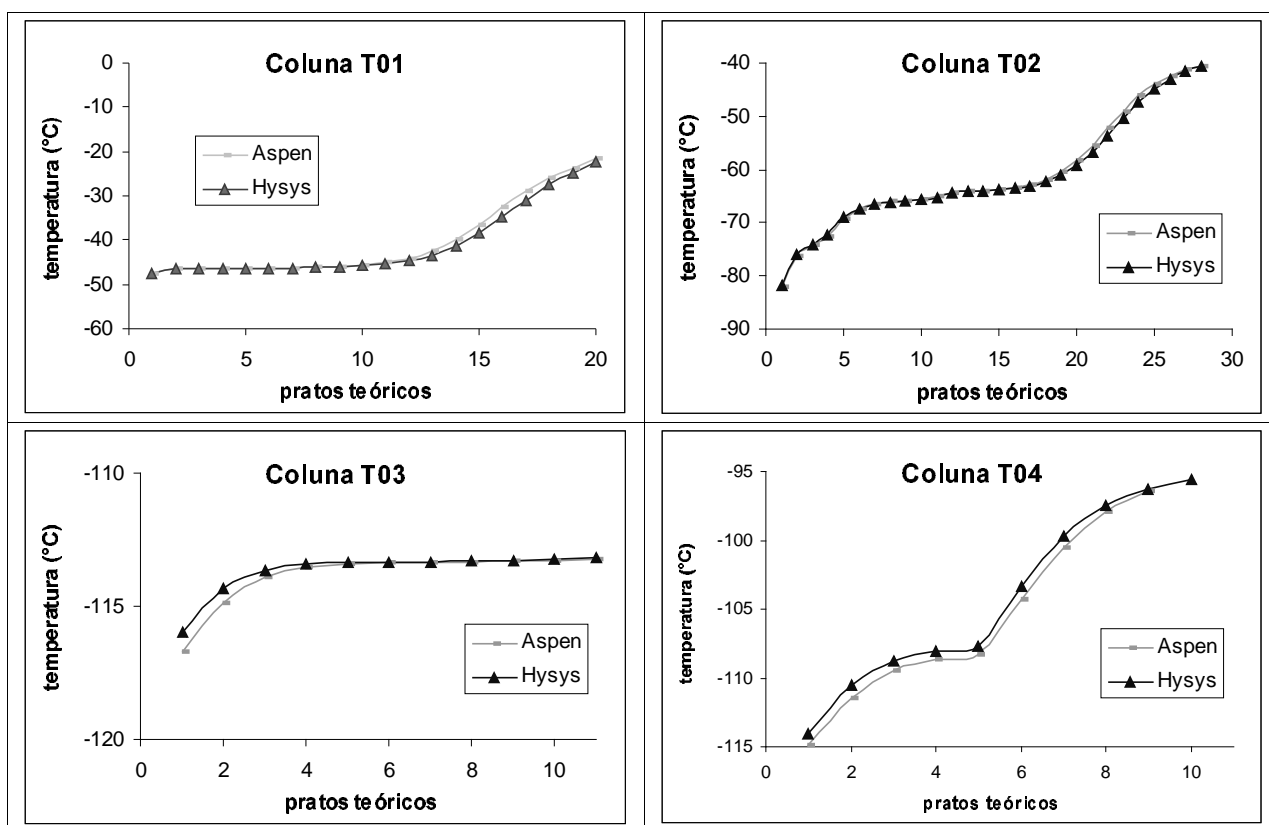


Figura 4.6: Comparação entre os resultados do Aspen Plus e Hysys Process dos perfis de temperatura das colunas de fracionamento da unidade.

Estes resultados levam à conclusão de que ambos os simuladores podem ser utilizados para que se obtenham os mesmos resultados em termos de simulação estacionária. A escolha pode ser feita pela simples facilidade de acesso a um deles ou pela preferência do usuário por um dos simuladores dada a sua maior familiaridade com ele. Foram constatadas algumas vantagens de cada um deles, descritas a seguir.

O Hysys Process parece propiciar um aprendizado mais rápido e possui uma interface gráfica que torna a detecção de problemas de convergência do caso simulado mais intuitiva, indicando a região que não está convergindo por um esquema de cores diferenciado. Outra vantagem deste simulador é a possibilidade de se fazer pequenas alterações na simulação, sem que se tenha que recalculer todo o fluxograma novamente, só a região afetada é recalculada. Isto torna a etapa de aprimoramento do fluxograma uma tarefa mais rápida e agradável. Por fim este simulador gera uma carga computacional menor, além de produzir arquivos menores.

O Aspen Plus possui a qualidade de ter ferramentas mais refinadas de convergência numérica, o que pode possibilitar a convergência de casos mais críticos, que, de outra maneira, não viriam a ter solução. Outro aspecto positivo é relativo ao fato de que ele possui uma gama maior de facilidades em termos de análise dos resultados e uma melhor facilidade de comunicação com outros softwares, aumentando em muito o seu potencial.

A próxima etapa deste trabalho corresponde ao desenvolvimento da simulação dinâmica da unidade, ajustada aos dados reais da unidade. Os resultados da simulação

estacionária mostraram-se bons o bastante para servirem de base para a simulação dinâmica. O próximo capítulo abordará este assunto.

Capítulo 5

Simulação Dinâmica da Unidade

5.1 Desenvolvimento da Simulação Dinâmica

5.1.1 Escolha do simulador

Inicialmente existiam duas opções para que se efetuasse a simulação dinâmica da unidade, através da disponibilidade de utilização tanto do modo dinâmico do Hysys Process, como do Aspen Dynamics, que corresponde ao software que executa o modo dinâmico da linha Aspen. Para os dois casos haviam simulações estacionária satisfatórias, que seriam utilizadas como ponto de partida, já demonstradas no capítulo 4.

O modo dinâmico do Hysys Process, porém, não teve um bom desempenho. Os modelos locais utilizados para o cálculo das propriedades termodinâmicas com o objetivo de diminuir a carga computacional eram muito simplificados. Quando se definiu que este cálculo fosse realizado pelo modelo rigoroso, a simulação tornou-se mais lenta e o tempo de processamento aumentou. Outro aspecto negativo foi a precariedade do método de integração numérica, limitado a métodos de integração explícitos de baixa ordem. Estes dois aspectos tornaram a simulação dinâmica extremamente lenta, quando não instabilizava, inviabilizando a utilização do Hysys Process.

A simulação dinâmica foi então realizada no Aspen Dynamics (vide AspenTech, 1999). Este simulador utiliza o Euler implícito de passo variável como método padrão de integração numérica (tendo outros de maior ordem), além de possuir uma melhor ferramenta de geração e utilização de modelos locais, viabilizando o seu uso no cálculo das propriedades termodinâmicas. A simulação realizada se mostrou mais estável e rápida que a realizada no outro simulador, fato que definiu a sua escolha.

Posteriormente foi disponibilizado um novo simulador da linha Hyprotech, trata-se do Hysys Plant, versão 2.1 (vide Hyprotech, 1999). Este novo software já possui um método numérico de integração implícito (Euler implícito de passo variável). Porém, como esta nova alternativa chegou num momento no qual a simulação dinâmica já tinha atingido um nível

satisfatório no Aspen Dynamics e a avaliação das estruturas de controle propostas já estava sendo realizada, optou-se, então, por finalizar os trabalhos utilizando-se este software.

5.1.2 Simplificações realizadas

A simulação dinâmica, por envolver a integração no tempo, implica num esforço computacional bem maior do que a simulação estática. Assim sendo, um passo muito importante é a redução do número de equações envolvidas na modelagem. O Aspen Dynamics possui uma característica que o diferencia do Aspen Plus (estacionário), o modo dinâmico é do tipo orientado por equações, enquanto que o modo estático é do tipo modular seqüencial. Os simuladores do tipo modular seqüencial resolvem um equipamento por vez, seguindo uma seqüência determinada. No caso orientado por equações, todas as equações são resolvidas simultaneamente (ou em blocos independentes particionados). Desta forma tem-se no Aspen Dynamics sistemas de equações algébrico-diferenciais de dimensões muito elevadas para serem resolvidas.

Foram então seguidas as mesmas diretrizes já utilizadas na simplificação do modelo da simulação estática, trabalhou-se no sentido de diminuir o número de equações presentes, além de eliminar regiões que tornavam a simulação extremamente lenta, porém sempre tomando-se o cuidado de não se modificar a boa representação da unidade, sem comprometer as dinâmicas essenciais para a nossa análise. Estabeleceu-se um compromisso entre velocidade e qualidade da simulação.

Componentes envolvidos

O primeiro esforço em termos de simplificação foi realizado no sentido de se diminuir o número de componentes envolvidos. A retirada de um único componente irá diminuir uma equação em cada balanço de massa, realizado em todos os equipamentos do fluxograma e cada estágio teórico das colunas de fracionamento.

Observando-se que o comportamento do acetileno em cada vaso de flash, ou coluna de destilação era muito semelhante ao do etano e como a fração deste componente na carga já era baixa (1% da composição), optou-se por agrupá-lo com o etano. A composição da carga da unidade utilizada na simulação dinâmica está expressa na tabela que segue:

Tabela 5.1: Composição da carga da unidade utilizada nas simulações dinâmicas.

Componentes utilizados	Composição Molar (fração molar)
1) hidrogênio	0,17
2) metano	0,30
3) eteno	0,35
4) etano	0,07
5) propeno	0,08
6) 1-buteno	0,03

Simplificações no fluxograma

A próxima ação de simplificação foi com relação ao fluxograma, para que o tempo de computação fosse diminuído. Conforme o discutido no capítulo 3, que analisa a problemática da unidade, alguns efeitos são fundamentais e não podem ser prejudicados nestas simplificações, são eles:

- Distribuição do corte C2+ entre as colunas T01 e T02.
- Reciclos mássicos relativos a recuperação de eteno, envolvendo as colunas T03 e T04.
- Integração energética entre a carga da unidade e a coluna T02.

Levando-se estas questões em conta, e a estrutura de controle atual da planta real, as simplificações feitas serão descritas abaixo. Acompanhando figura 5.1 da planta, reproduzida novamente, para compreender melhor o que foi assumido, tem-se:

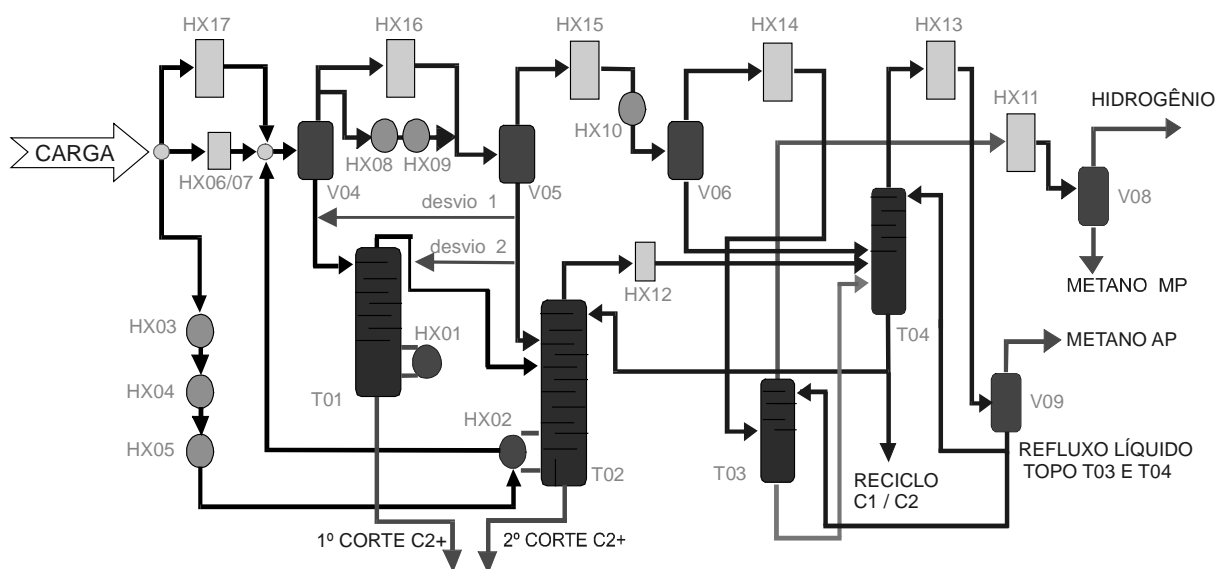


Figura 5.1: Representação simplificada da unidade desmetanizadora.

1. Desconsiderou-se a integração energética do trem frio

Os trocadores de calor do trem frio (HX11, HX13, HX14, HX15, HX16 e HX17) foram substituídos por resfriadores com cargas térmicas constantes, ou com temperaturas de saídas controladas, conforme o caso. Assim sendo, desprezou-se a dinâmica da integração energética do lado frio destes trocadores. Esta simplificação não prejudicou os efeitos citados acima, e proporcionou um grande aumento na velocidade da simulação e na facilidade de convergência do sistema. Acredita-se que as integrações energéticas desprezadas estavam aumentando em muito o grau de rigidez do sistema.

2. Simplificação dos ramais secundários de carga

Os dois ramais secundários da carga foram agrupados num único ramal, e os trocadores de calor HX06, HX07 e HX17 foram também representados por um único trocador, com carga térmica constante, visto que a vazão para estes ramais permanece quase inalterada, assim como as cargas térmicas destes três trocadores envolvidos.

3. Simplificações em outros trocadores de calor

Os trocadores de calor HX08, HX09 e HX16 foram substituídos por um único trocador de calor, com temperatura de saída controlada pela variação da sua carga térmica, decidiu-se fazer assim pois os trocadores HX08 e HX09 possuem controle de nível com boa disponibilidade do fluido de refrigeração, mantendo a temperatura do vaso V05 quase constante. Os dados de transientes de planta indicam que esta consideração é válida, conforme pode ser observado no comportamento da temperatura do vaso V05 na figura 3.10 (f).

O mesmo tratamento foi dado aos trocadores HX10 e HX15, que foram substituídos por um único trocador com temperatura de saída controlada. Já os trocadores HX03, HX04, HX12 e HX14 foram implementados como sendo trocadores com carga térmica constante. O trocador HX11 e o vaso V08 foram desconsiderados, por não fazerem parte de ciclos, e nem trazerem informações adicionais importantes.

Foram instalados controles semelhantes aos da planta real, para atuar na especificação dos cortes C2+ em termos de metano e na perda de eteno no topo do vaso V09.

Com estas simplificações foi possível diminuir consideravelmente a carga computacional da simulação, sem contudo comprometer a qualidade dos resultados. As próximas seções deste capítulo mostrarão comparações entre os dados de planta e dados da simulação dinâmica.

5.1.3 Considerações adicionais

Algumas considerações devem ser feitas no que concerne aos volumes dos equipamentos, que influenciam diretamente nas dinâmicas do processo. As dinâmicas dos vasos de separação foram desprezados, fazendo com que variações na vazão ou temperatura das correntes de entrada sejam refletidas instantaneamente nas correntes produtos de topo e de fundo destes equipamentos.

As colunas de fracionamento tiveram seus inventários reais (*holdups*) considerados na simulação dinâmica. Como as colunas simuladas têm menos pratos do que as reais, para que se representasse a eficiência global considerada, de cerca de 60%, os inventários de cada bandeja foram ampliados, de modo que o inventário total da coluna real coincidissem com o inventário da coluna simulada. Quanto a detalhes de projeto das colunas, todas elas foram simuladas com pratos de fluxo de passe simples, o que corresponde a realidade para as colunas T02, T03 e T04. Porém a coluna T01 possui pratos de fluxo de passe duplo.

Os trocadores de calor também tiveram seus volumes desprezados, tanto do lado frio como do lado quente. Esta consideração despreza as suas dinâmicas.

5.2 Dados de planta x dados da simulação dinâmica

5.2.1 Comparação num estado estacionário da planta

A primeira etapa consistirá numa comparação entre dados da planta numa determinada condição operacional, e resultados da simulação dinâmica para o mesmo caso de operação. Foram coletados dados de planta durante um período no qual não se verificou a ocorrência de transientes, nem qualquer outra anormalidade. A composição da carga é aquela expressa na tabela 5.1, referente a dados de laboratório deste mesmo período. A primeira comparação é relativa às correntes que chegam ou saem da unidade.

Tabela 5.2: Correntes que alimentam ou deixam a unidade representada na simulação dinâmica.

	dados da planta real	resultados da simulação dinâmica	diferença (%)
Ramal principal da carga (ton/h)	173,0	175,0	-1,2
Ramal secundário da carga (ton/h)	28,0	26,0	7,1
Carga total (ton/h)	201,0	201,0	0,0
1 corte C2+ (ton/h)	87,0	83,7	3,8
2 corte C2+ (ton/h)	60,0	65,6	-9,3
Reciclo metano-eteno (ton/h)	8,0	7,9	1,3
Topo V09 / Metano AP (ton/h)	21,0	23,9	-13,8
Topo T03 / Metano MP + H2 (ton/h)	22,0	20,9	5,0

As diferenças máximas encontradas situam-se próximas a 10%, para mais, ou para menos. Estas discrepâncias são aceitáveis, visto que os instrumentos de medidas também possuem erros referentes a sua precisão ou falta de calibração, sobre as quais não foram coletadas informações.

Tabela 5.3: Teores de metano e eteno das correntes que deixam a unidade.

	Planta real	Aspen Dynamics	Diferença (%)
1 corte C2+			
teor metano (ppm mol)	183	300	-63,9
teor eteno (% mol)	47	50	-6,4
2 corte C2+			
teor metano (ppm mol)	229	300	-31,0
teor eteno (% mol)	76	80	-5,3
Metano AP (topo V09)			
teor eteno (% mol)	0,3	0,3	0,0
Produto topo T03			
teor eteno (% mol)	1,0	0,4	60,0

Neste caso os erros percentuais crescem bastante, mas há de se destacar que a ordem de grandeza dos valores está correta, o que já é um grande passo quando se trabalha com teores baixos de componentes, na ordem de 300 ppm, no caso dos cortes de C2+, ou abaixo de 1% mol, como são os teores de eteno nas perdas de topo das colunas T03 e T04. No caso específico do teor de metano nos cortes C2+, a diferença se deve a diferente configuração dos controladores do teor de metano, entre a planta real e a simulação dinâmica. Enquanto na simulação dinâmica, o set-point do teor de metano era de 300 ppm mol, em relação a todos os demais componentes, no caso da planta real, o set-point é de 300 ppm mol de metano em relação ao eteno somente. Mas esta diferença não chega a alterar os perfis das colunas, ou mesmo o seu comportamento dinâmico.

O teor de eteno no metano AP (perda no topo da coluna T04), na simulação dinâmica, é controlado pela manipulação da temperatura do vaso V09, que por sua vez, é controlada pela ação na carga térmica do HX13, de modo semelhante ao que ocorre na planta real. Neste caso a simulação concorda com o dado de planta.

Tabela 5.4: Comparação entre resultados da simulação e dados de planta para os vasos de separação.

	Planta real	Aspen Dynamics	Diferença (%)
Vaso V04			
Temperatura		-33,4	
Pressão	36,5	36,5	0,0
Vazão de fundo	104,0	103,0	1,0
Vaso V05			
Temperatura	-75,0	-75,0	0,0
Pressão	36,0	36,0	0,0
Vazão de fundo	34,0	41,0	-20,6
Vazão desvio 1	2,5	2,6	-4,0
Vazão desvio 2	14,7	15,3	-4,1
Vaso V06			
Temperatura	-96,0	-96,0	0,0
Pressão	34,4	35,0	-1,7
Vazão de fundo	14,0	15,2	-8,6
Vaso V09			
Temperatura	-120,0	-119,0	0,8
Pressão	13,0	13,1	-0,8
Vazão de fundo p/ T03	2,0	2,6	-30,0
Vazão de fundo p/T04	4,5	4,3	4,4

O teor de eteno no topo da coluna T03 é o que mais apresenta discrepância entre a planta e a simulação. A perda de eteno simulada está bem abaixo da real. Informações posteriores fornecidas pelo corpo de engenharia responsável pela planta referiram à ocorrência de um excessivo arraste de líquido no topo desta coluna, fator este que não é previsto no simulador, que admite que o vapor de topo da coluna esteja em equilíbrio termodinâmico com o líquido do prato. Inclusive estuda-se a possibilidade de se colocar um

demister no topo desta coluna para diminuir este arraste. Mais esforços podem ser empregados para simular melhor esta etapa da unidade. Porém o desempenho desta região da simulação não afeta a sua qualidade no que se refere ao desempenho hidráulico das colunas T01 e T02. A tabela 5.4 mostra o desempenho dos vasos de separação, responsáveis pela distribuição de carga entre as colunas.

Todos os vasos estão sendo simulados sob as mesmas condições operacionais (temperatura e pressão) da planta. Os resultados das vazões de fundo são aceitáveis. As maiores diferenças são relativas a vazão de fundo do vaso V05 que alimenta o prato 4 da coluna T02 e a vazão de fundo do vaso V09 que serve de refluxo líquido de topo da coluna T03. A tabela 5.5 é relativa às colunas de fracionamento da unidade.

Tabela 5.5: Comparação entre resultados da simulação e dados de planta para as colunas de fracionamento, relativa as vazões de topo e fundo e pressão de operação.

	Planta real	Aspen Dynamics	Diferença (%)
Coluna T01			
Pressão de topo (kgf/cm ²)	15,80	15,80	0,0
Pressão de fundo(kgf/cm ²)	16,00	16,00	0,0
Vazão de fundo(ton/h)	86,60	83,80	3,2
Coluna T02			
Pressão de topo (kgf/cm ²)	12,90	12,90	0,0
Pressão de fundo(kgf/cm ²)	13,10	13,20	-0,8
Refluxo topo (ton/h)	25,00	22,60	9,6
Carga 2 (ton/h)	34,00	41,00	-20,6
Vazão de fundo(ton/h)	60,00	65,60	-9,3
Coluna T03			
Pressão de topo (kgf/cm ²)	34,10	34,10	0,0
Pressão de fundo(kgf/cm ²)	34,16	34,24	-0,2
Vazão de topo(ton/h)	22,00	20,90	5,0
Refluxo topo (ton/h)	2,00	2,60	-30,0
Vazão de fundo(ton/h)	10,00	9,00	10,0
Coluna T04			
Pressão de topo (kgf/cm ²)	13,10	13,10	0,0
Pressão de fundo(kgf/cm ²)	13,15	13,26	-0,8
Refluxo topo (ton/h)	4,50	4,30	4,4
Carga topo (ton/h)	10,00	9,00	10,0
Produto de fundo (ton/h)	33,00	30,50	7,6

As maiores discrepâncias entre os resultados de simulação e os dados de planta não ultrapassam 10% para as vazões de produto de topo e fundo, embora em alguns casos se verifiquem diferenças bem superiores nas alimentações. Para finalizar a análise das colunas de fracionamento, serão verificados seus perfis de temperatura.

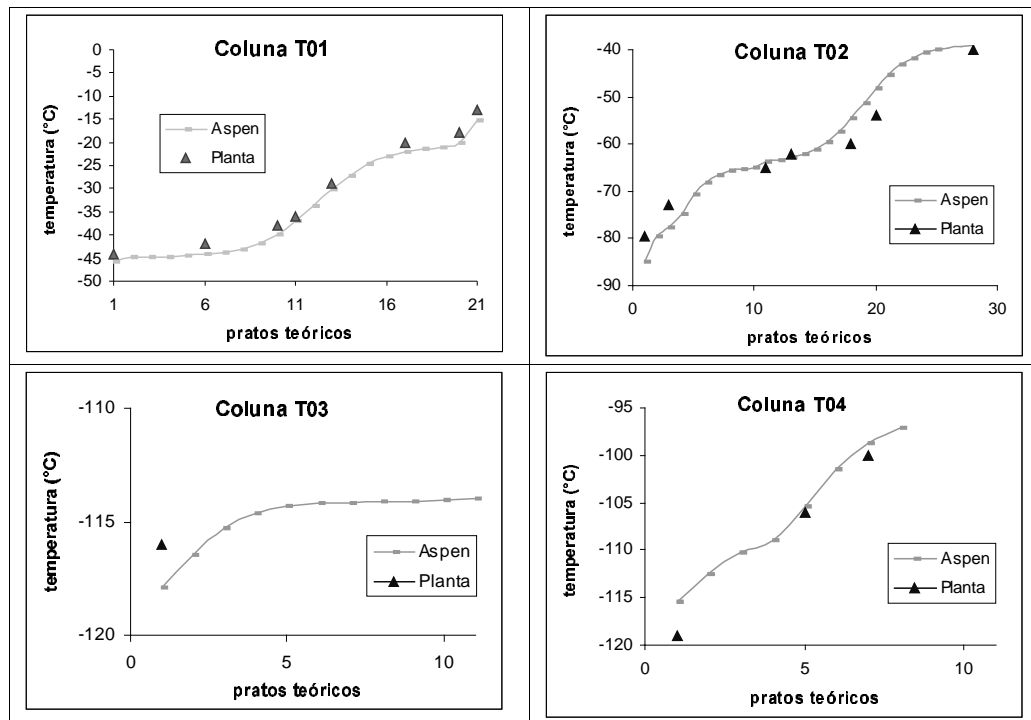


Figura 5.2: Perfis de temperatura da simulação dinâmica comparados com dados de planta, para as colunas de fracionamento da unidade. Os dados de planta correspondem a valores médios de trends da planta durante uma condição operacional similar à simulada, pouco afetada por perturbações.

Os perfis de temperatura das colunas T01 e T02 estão reproduzindo de maneira muito satisfatória os perfis de planta. No caso da coluna T02, as maiores diferenças estão situadas na região intermediária da seção inferior da coluna, justamente onde o parâmetro de interação binária do metano-eteno tem maior importância, segundo o estudo apresentado no capítulo 4, na seção 4.2.3. Só um maior esforço no sentido de aprimorar a estimativa do k_{ij} metano-eteno pode melhorar consideravelmente a qualidade da simulação nesta região da coluna. A coluna T03, por sua vez, só possui instrumento de medição de temperatura no topo, onde um erro relativamente grande é observado. Isto vem de acordo com a discrepância já verificada no teor de eteno da corrente de topo medida e simulada. A simulação da coluna T04 apresenta boa reprodução no seu perfil de temperatura, embora a temperatura de topo também apresente maior discrepância entre os resultados da simulação e o de planta.

Após a comparação com os principais dados de planta a que se tem acesso através de medições, pode-se afirmar que o simulador dinâmico está reproduzindo muito bem os resultados para uma condição estável da planta, sem a ocorrência de transientes. A reprodução da distribuição da carga entre as quatro colunas de fracionamento, através dos vasos de flash, é satisfatória, assim como o desempenho das colunas T01 e T02, responsáveis pela produção dos cortes C2+. As principais discrepâncias encontradas se referem a perda de eteno no topo da coluna T03, indicando que a modelagem na região de recuperação de etileno poderia ser melhorada. Mas para o problema específico desta planta, que se refere a estrutura de controle que define a distribuição de carga entre as colunas T01 e T02, o resultado obtido é satisfatório, possibilitando o estudo de desempenho das várias estruturas de controle propostas.

5.2.2 Comparação durante transientes da planta

O grande objetivo da simulação dinâmica de uma unidade é reproduzir o seu comportamento durante um transiente operacional. Após a verificação efetuada no tópico anterior que permitiu afirmar que a simulação consegue reproduzir um estado operacional estável da planta, o próximo passo consiste na comparação entre os dados de planta referente a um transiente, comparados com a mesma perturbação efetuada na simulação.

Deve-se salientar que nem sempre existiam os dados de planta de medições que seriam importantes, seja pela falta de instrumento de medida adequado, ou por problema de armazenamento dos valores, mesmo assim, foi possível estabelecer uma boa comparação entre a qualidade da simulação dinâmica, no que se relaciona com a sua capacidade de reproduzir o que ocorre na planta real.

Subida de carga da unidade e abertura do desvio 1

Os dados de planta acompanhando transientes e seus efeitos foram coletados durante 50 horas de operação. Já a simulação dinâmica envolveu um tempo de operação simulada de três horas, quando foram realizados as mesmas perturbações, porém com um menor intervalo de tempo entre elas, tomando-se o cuidado para que os efeitos dinâmicos não fossem prejudicados. Procedeu-se assim com o intuito diminuir a carga computacional envolvida e os tempos de simulação.

O caso estudado é referente a um aumento de carga na planta real de cerca de 10 ton/h, passando de 192 ton/h para 202 ton/h (5 horas), seguida do aumento da vazão do desvio 1 (16 horas) e posterior diminuição desta vazão (25 horas). A simulação dinâmica procedeu o aumento de carga de 192 ton/h para 202 ton/h, através de uma perturbação do tipo degrau, no tempo simulado de 0,5 horas e abertura e fechamento do desvio 1 nos tempos simulados de 1 hora e 1,8 horas respectivamente. As figuras que serão apresentadas mostram sempre os dados coletados na planta, e logo abaixo o resultado da simulação dinâmica, para o mesmo caso operacional, de modo que se estabeleça facilmente a comparação entre eles. A figura 5.3 retrata a carga da unidade ao longo do tempo.

Como se pode perceber na figura 5.3, a subida da carga na planta real inicialmente é do tipo rampa, seguida de uma subida brusca do tipo degrau. A subida de carga na simulação é do tipo degrau. O pico de temperatura na carga da unidade, que também pode ser visto nesta figura, não foi simulado.

A figura 5.4 por sua vez, mostra o comportamento das correntes de fundo dos vasos V04 e V05, além da abertura dos desvios 1 e 2. Esta figura está relacionada com a distribuição de carga entre as colunas T01 e T02. A abertura do desvio 1 implica numa maior utilização da coluna T01 e uma menor utilização da coluna T02.

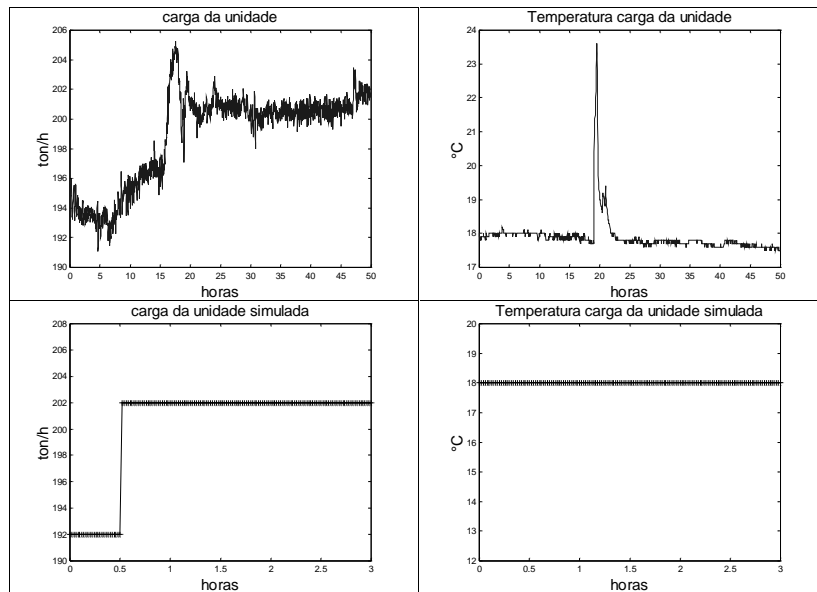


Figura 5.3: Vazão e temperatura da carga da unidade.

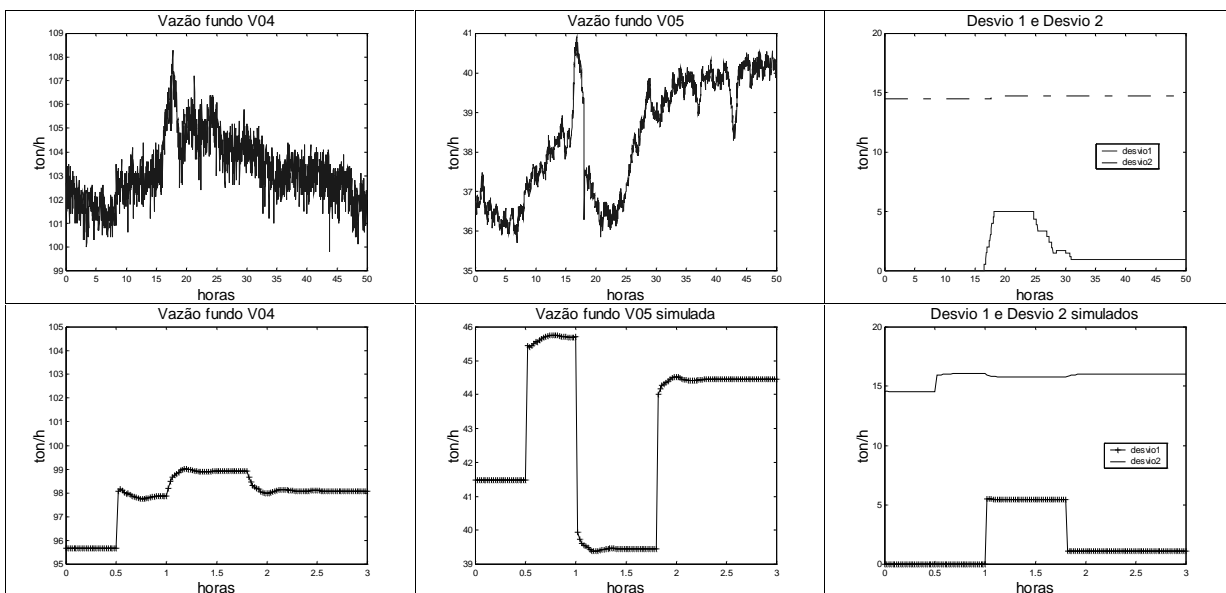


Figura 5.4: Vazões de fundo dos vasos V04 e V05 e desvios 1 e 2.

As vazões de fundo dos vasos V04, V05 e V06 que comandam a distribuição de carga nas colunas, estão diretamente ligadas com a temperatura destes equipamentos. Os vasos V05 e V06 possuem uma temperatura quase constante. Já o vaso V04 tem sua temperatura afetada tanto pela carga da unidade como pela vazão no desvio 1, conforme já discutido na seção 3.4.1. O resultado de simulação mostra claramente este efeito na figura 5.5. A temperatura do vaso V04 sobe com o aumento de carga da unidade. Uma maior carga da unidade representa maior vazão de fundo na coluna T02, ou seja, maior calor deve ser fornecido no refeedor HX02, o que implica num menor resfriamento prévio no HX05 (trocador anterior ao refeedor). Isto faz com que o ramal principal da carga chegue ao refeedor HX02 com uma temperatura mais elevada, fazendo com que o vaso V04 também opere com uma temperatura mais alta.

A abertura do desvio 1, pelo mesmo princípio, diminui a temperatura do vaso V04. Uma maior vazão desviada para a coluna T01 significa uma menor vazão de fundo da coluna T02, ou seja, menos calor deve ser fornecido no refeedor HX02, a carga deve ser mais resfriada no HX05, fazendo com que ela chegue numa temperatura mais baixa no vaso V04. Como não se tinham informações de planta da temperatura do vaso V04, foi representado o nível de propeno refrigerante no trocador HX05, mostrando comportamento semelhante ao raciocínio desenvolvido. Observe que a abertura do desvio 1 coincide com uma subida no nível do HX05, isto é, um maior resfriamento é providenciado neste equipamento, vindo de acordo com o raciocínio exposto acima.

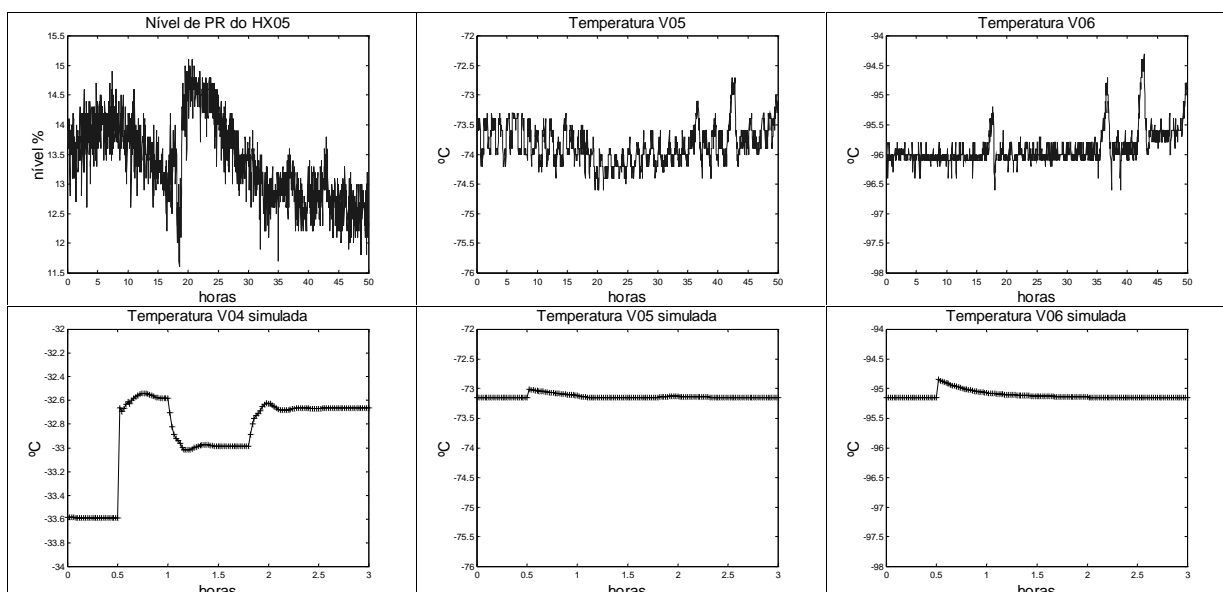


Figura 5.5: Nível do HX05 e temperaturas dos vasos V04, V05 e V06.

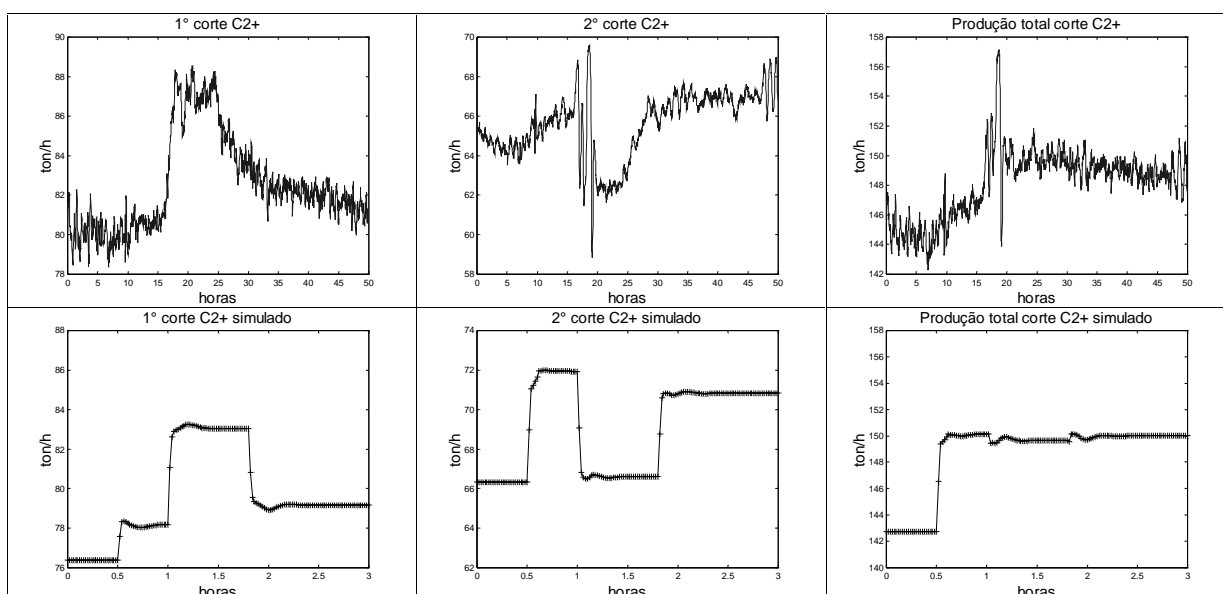


Figura 5.6: Produto de fundo das colunas T01 e T02, e corte C2+ total produzido na unidade.

A figura 5.6 mostra a produção de C2+. A simulação vem a ratificar o observado nos dados de planta, ou seja, a abertura do desvio 1 tem a capacidade de manter a produção total de C2+ no mesmo patamar, com a vantagem de desafogar a coluna T02, utilizando melhor a coluna T01. O fato da simulação dinâmica estar conseguindo reproduzir a distribuição de carga entre as colunas T01 e T02, frente a perturbações, é extremamente positivo, credenciando o modelo dinâmico a ser uma importante ferramenta na análise da estrutura de controle atual da unidade e das soluções propostas.

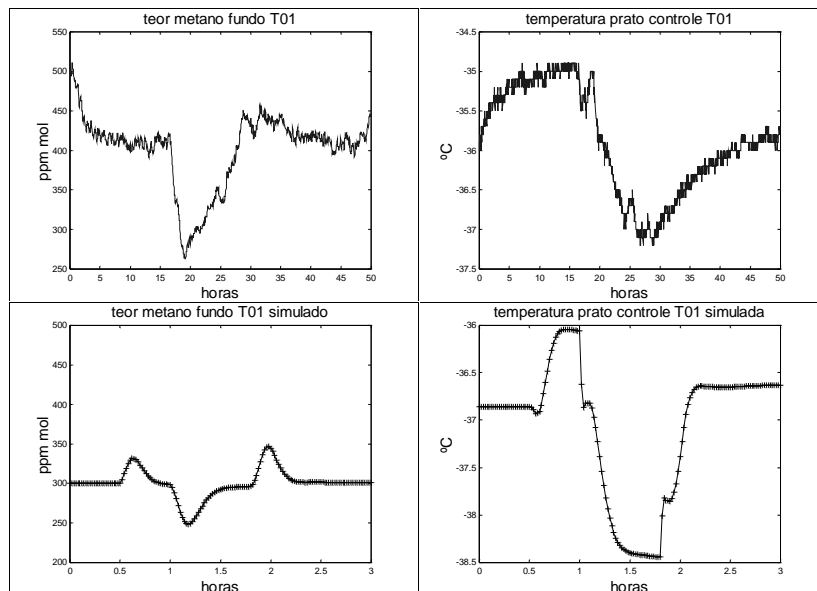


Figura 5.7: Teor de metano no produto de fundo e temperatura do prato de controle da coluna T01

A temperatura de controle da coluna T01, mostrada na figura 5.7, apresenta igual comportamento na simulação e na planta real. A abertura do desvio 1 provoca uma diminuição na temperatura de controle desta coluna. Com relação aos teores de metano, também mostrados na figura 5.7, algumas diferenças são encontradas. Na simulação verifica-se um pico de metano no fundo da coluna T01 logo após a subida da carga (0,5 horas), este pico é causado pela subida de carga da unidade, que num primeiro momento reflete no aumento de carga no topo da coluna, que corresponde ao aumento do seu refluxo de topo, que carrega mais metano para o fundo. A ação de controle é responsável pelo retorno do teor de metano ao valor especificado. Este fenômeno não é observado nos dados de planta, porque neste caso a escala de tempo é bem maior, acabando por mascarar este tipo de fenômeno. A queda do teor de metano devido a abertura do desvio 1 é observada tanto na simulação como nos dados de planta. O fechamento do desvio 1 também causa um pico no teor do metano obtido na simulação (1,8 horas). Este pico é devido a um aumento da temperatura do vaso V04, causado pelo fechamento do desvio 1, como pode ser visto na figura 5.5, em 1,8 horas. A temperatura mais alta do vaso V04 produz uma carga da coluna T01 com menor teor de metano, o fechamento do desvio 1 também é responsável pela diminuição do teor de metano na coluna T01, visto que o condensado do vaso V05 é mais rico em metano do que o condensado do vaso V04. De modo geral, as curvas dos dados de planta e de simulação reportadas na figura 5.7 são bastante semelhantes.

A figura 5.8 analisa o resultado da simulação da coluna T02. De modo semelhante ao que se verificou para a coluna T01, a simulação dinâmica consegue representar bem o comportamento da temperatura de controle e do teor de metano desta coluna T02. Verifica-se uma queda brusca no teor do metano logo após a subida de carga da unidade, tanto nos dados de planta (17 horas), como na simulação (0,5 horas), devido a vaporização excessiva no refeedor HX02. Na curva do teor de metano simulado, observa-se um queda no teor de metano, pela abertura do desvio 1 (1 hora), devido a diminuição do refluxo de topo que isto representa, e uma queda quando do fechamento deste desvio (1,8 horas), causada pelo efeito inverso, ou seja, aumento de refluxo de topo. Quanto à temperatura de controle simulada, são observados picos e quedas acentuadas, nos mesmos tempos dos observados no teor de eteno, que se devem as ações de controle tomadas para se manter o produto de fundo da coluna especificado. Não são observados os picos e quedas nas curvas do teor de metano do fundo da coluna T02 e na temperatura de controle da coluna dos dados de planta, devido a escala de tempo ser muito grande neste caso, acabando por mascarar estes fenômenos.

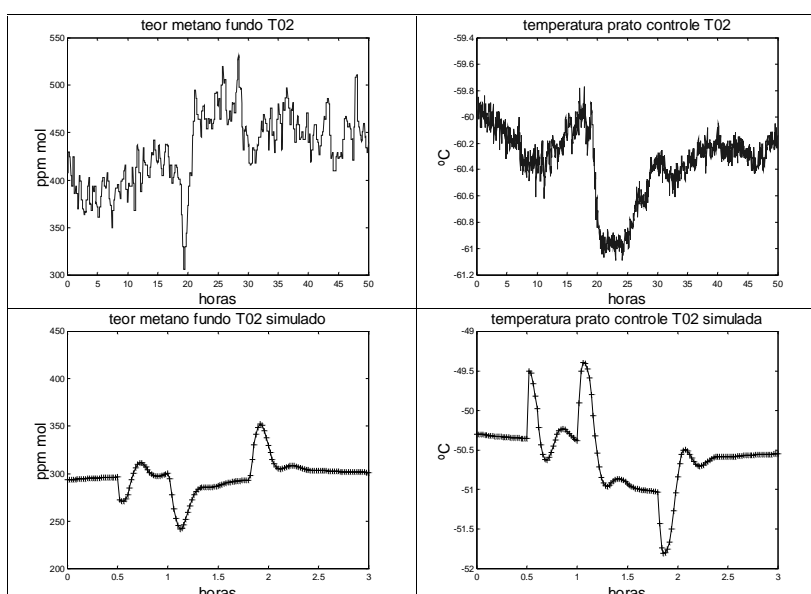


Figura 5.8: Teor de metano no produto de fundo e temperatura do prato de controle da coluna T02.

A seguir serão comparados os resultados referentes às colunas T03 e T04, quando são observadas as maiores discrepâncias. Não existe medição da vazão de topo da coluna T03, mas existe vazão das correntes de metano MP e hidrogênio, que são originadas desta corrente após o vaso de flash V09. Na figura 5.9 pode-se perceber o aumento da vazão de topo desta coluna com o aumento de carga da unidade, tanto nos dados de planta como na simulação. O teor de eteno no topo da coluna T03 verificado na planta real e na simulação dinâmica difere significativamente, acredita-se que a causa disto seja o arraste de líquido no topo desta coluna, conforme já foi mencionado anteriormente na seção 5.3.1, que não está sendo levado em conta no modelo dinâmico.

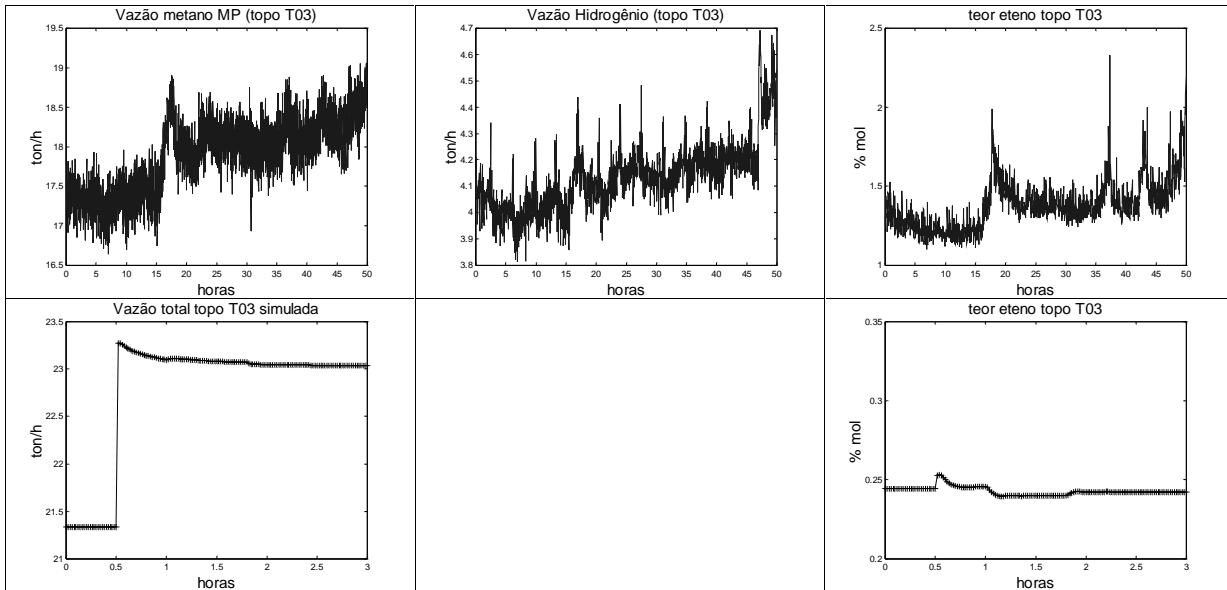


Figura 5.9: Teor de eteno e vazões relacionadas com a coluna T03.

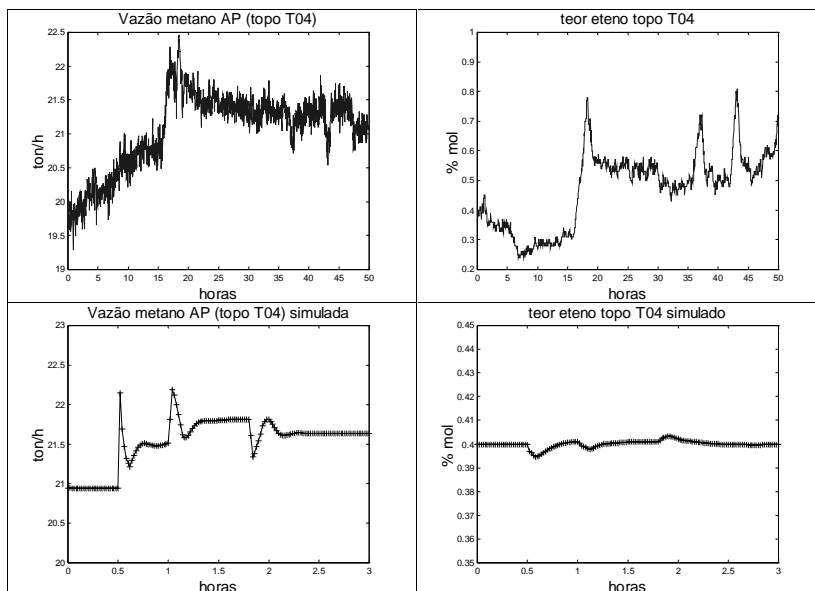


Figura 5.10: Vazões e teor de eteno no topo da coluna T04.

O resultado da coluna T04 ilustrado na figura 5.10, já é bem melhor que o da coluna T03. A vazão de topo apresenta comportamento bem semelhante. Já o teor de eteno no topo concorda num primeiro momento, mas vem diferir após a subida de carga. Neste caso a perda de eteno da coluna verificada na planta é maior do que a perda da simulação, que se mantém no mesmo patamar. Esta diferença é referente a ação de controle da perda de eteno no topo da coluna T04, que está em malha fechada na simulação dinâmica, e em malha aberta na planta real, conforme se apurou posteriormente. São observados três picos e quedas na vazão simulada do metano MP, causados pela subida de carga da unidade, abertura do desvio 1 e fechamento do desvio 1 respectivamente.

Subida de carga da unidade e fechamento parcial do desvio 2

Outro transiente operacional foi analisado, trata-se de uma subida de carga de cerca 185 ton/h para 205 ton/h, aliada a um fechamento parcial do desvio 2, que tem sua vazão diminuída de 15 ton/h para 11 ton/h, com o posterior retorno a vazão anterior de 15 ton/h. Como neste caso não houve deslocamento de carga da coluna T02 para a coluna T01, os efeitos mais fortes se relacionavam a coluna T02. Um aumento de 15 ton/h é uma perturbação bem típica da unidade, visto que ela corresponde a entrada em operação de um forno de craqueamento de nafta. A figura 5.11 mostra as principais perturbações (carga e desvio 2), bem como algumas vazões relacionadas a coluna T02 (vazão da carga no prato 4, produto de fundo da coluna), teor de metano e eteno no fundo e nível do HX05. Mais uma vez o espaço de tempo simulado foi bem menor que o da planta real. Optou-se por simular as perturbações num espaço de tempo mais curto, diminuindo assim a carga computacional envolvida e agilizando a obtenção de dados simulados, sem que fossem perdidas informações.

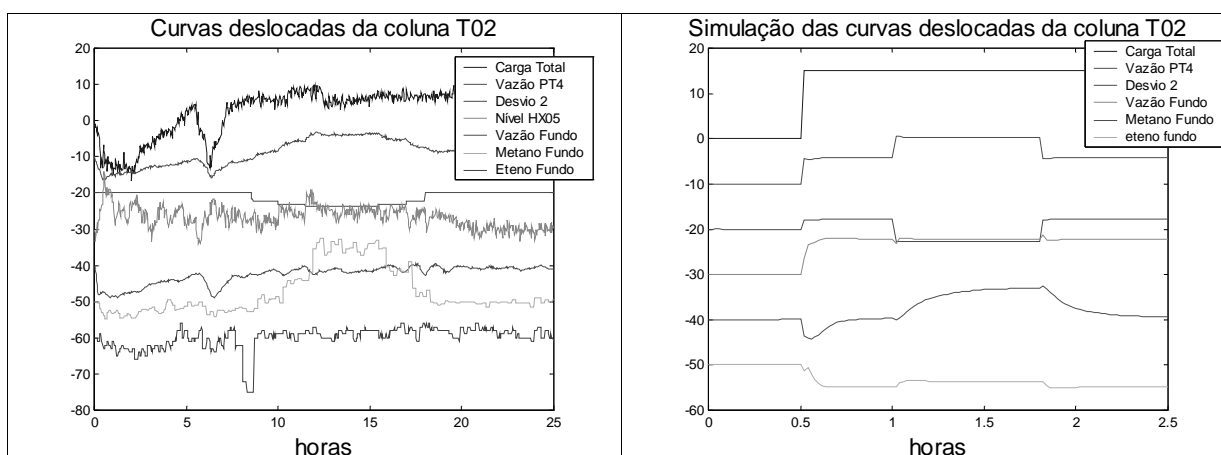


Figura 5.11: Dados da planta e resultados simulados para a carga da unidade e variáveis de operação relacionadas com a coluna T02. As curvas representam as variações em relação ao valor inicial. Para permitir uma melhor visualização todas as curvas foram deslocadas em 10 unidades, e algumas delas foram ampliadas. A legenda obedece à ordem das curvas.

Como pode ser observado na figura 5.11, na planta ocorre um aumento de carga em forma de rampa (de 2 a 5 horas), seguido por uma queda brusca e um novo aumento desta vez mais rápido (6 a 7 horas). Foi simulada uma subida de carga do tipo degrau (0,5 horas), para agilizar o trabalho. Na planta real, o fechamento parcial do desvio 2 é verificado no período que vai de 8 a 18 horas, enquanto que na simulação este evento ocorre de 1 a 1,8 horas. Pode-se perceber que, como consequência do fechamento do desvio 2, ocorre um aumento na vazão para a seção superior da coluna (prato 4), e um aumento no teor de metano no fundo. A simulação consegue reproduzir estes efeitos. O teor de eteno no produto de fundo permanece num patamar constante, enquanto que na simulação, ocorre uma leve diminuição no teor de eteno, quando a unidade opera com uma carga mais elevada. Este comportamento é o esperado, pois com o aumento de carga uma maior fração de pesados estará presente no 2º corte C2+.

A figura 5.12 se relaciona a ação de controle da coluna T02. Observou-se que o controlador do teor de metano no fundo da coluna T02 estava em malha aberta na planta, o que foi reproduzido na simulação.

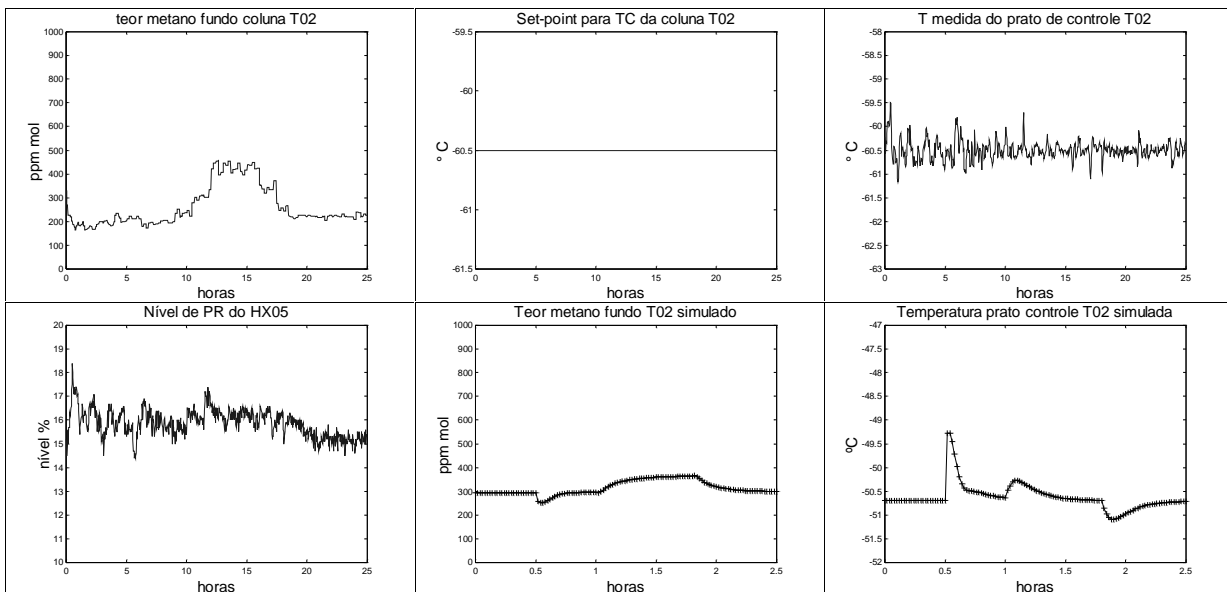


Figura 5.12: Dados de planta e de simulação que se relacionam com o controle da especificação do metano no 2° corte C2+.

Como se pode ver nesta figura, o fechamento do desvio 2 é responsável pelo momento de maior teor de metano no 2° corte C2+. O controlador de metano no fundo, que deveria alterar o set-point da temperatura de controle da coluna T02 está em malha aberta, pois, apesar do aumento no teor de metano, não é alterado o valor do sinal enviado para o TC. Para manter esta temperatura controlada num valor constante, se observa uma pequena elevação no nível de PR no HX05, que indica que menos calor está sendo injetado no refervedor HX02, ou seja, no fundo da coluna, para compensar a elevação da temperatura da corrente que alimenta a seção intermediária da coluna, devido à diminuição da vazão do desvio 2. A simulação da unidade também mostra o aumento do teor de metano no fundo da coluna T02. No momento da subida de carga da unidade, um pico de temperatura pode ser observado na simulação. Este pico não aparece na planta por que nela a subida de carga se deu mais lentamente, e não na forma de degrau, como na simulação.

A figura 5.13 mostra como se comportou o perfil de temperaturas da coluna T02. Com o fechamento do desvio 2 pode se observar uma dinâmica muito interessante, a temperatura dos pratos superiores da coluna (topo e prato 4) tem sua temperatura diminuída, enquanto que os pratos das regiões central e inferior tem sua temperatura aumentada. No final a diferença entre a temperatura de topo e fundo da coluna se eleva durante o período que a vazão para o desvio 2 diminui. Esta característica dinâmica é reproduzida na simulação.

A explicação para tal comportamento se relaciona com o fato do fechamento do desvio 2 implicar numa maior vazão para o topo da coluna T02, aumentando o refluxo líquido de topo, elevando o “frio de topo” na coluna, como já foi discutido no capítulo 3, na seção 3.3.2, que aborda o papel do desvio 2. Isto faz com que ocorra uma diminuição na temperatura da

região superior da coluna. Por outro lado, a diminuição da injeção de parte da corrente do fundo do vaso V05 na seção intermediária da coluna (fechamento do desvio 2) faz com que esta alimentação tenha uma temperatura mais elevada, pois enquanto a temperatura da corrente que vem do topo da T01 é de $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, a temperatura do produto de fundo do V05 é inferior a $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com isto as temperaturas das regiões central e inferior da coluna aumentam.

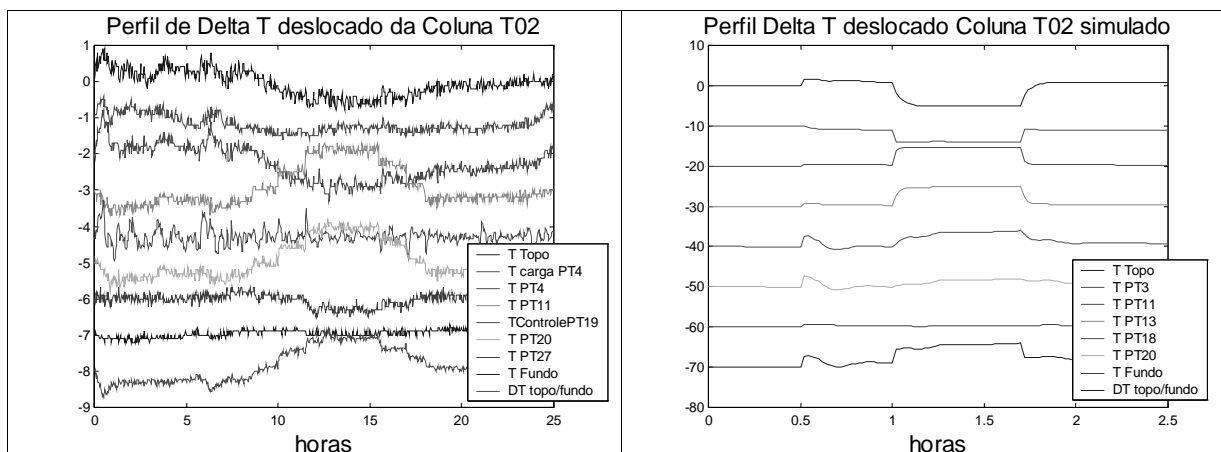


Figura 5.13: Temperaturas relacionadas com a coluna T02.

A ação de controle verificada na planta atua no sentido de manter a temperatura do prato de controle constante, que implica numa diminuição no calor injetado no refeedor HX02, isto pode ser evidenciado na figura 5.12 acompanhando-se a leve subida no nível de PR do HX05, que resfria mais a carga da unidade, fornecendo menos calor para o refeedor HX02. A menor injeção de carga térmica no refeedor HX02 e a diminuição da corrente líquida injetada na seção inferior da coluna (menor vazão do desvio 2), acabam por diminuir o refluxo interno daquela região, que passa a ter uma eficiência menor de separação, que provoca o aparecimento de um maior teor de metano no fundo da coluna. Se o controlador de metano do fundo da coluna estivesse ativado, a temperatura de controle seria elevada, mantendo o 2° corte C2+ especificado quanto ao teor de metano.

A figura 5.14 ilustra como se comportou o perfil de temperatura da coluna T02 e em especial da região inferior desta, com o fechamento do desvio 2, quando o controlador de metano do 2° corte C2+ permanece desativado. A temperatura do prato 19 foi controlada num valor constante ($-51,3^{\circ}\text{C}$). Com a diminuição do refluxo interno na seção, a eficiência da seção é diminuída com o fechamento do desvio 2 e o perfil de temperatura varia mais suavemente. Com isto a temperatura do último prato torna-se um pouco mais fria (com desvio = $-38,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ e sem desvio = $-39,0\text{ }^{\circ}\text{C}$), e verifica-se um aumento no teor do metano no fundo da coluna (com desvio = 302 ppm mol e sem desvio = 581 ppm mol).

Observa-se também que com o desvio 2 fechado, os pratos de topo têm uma temperatura mais baixa, enquanto que os pratos da região central da coluna apresentam uma elevação. Os últimos pratos sofrem um leve resfriamento. Tudo isto vem ao encontro do observado na figura 5.13. A figura 5.15 mostra como se comportou o perfil de metano na região inferior da coluna.

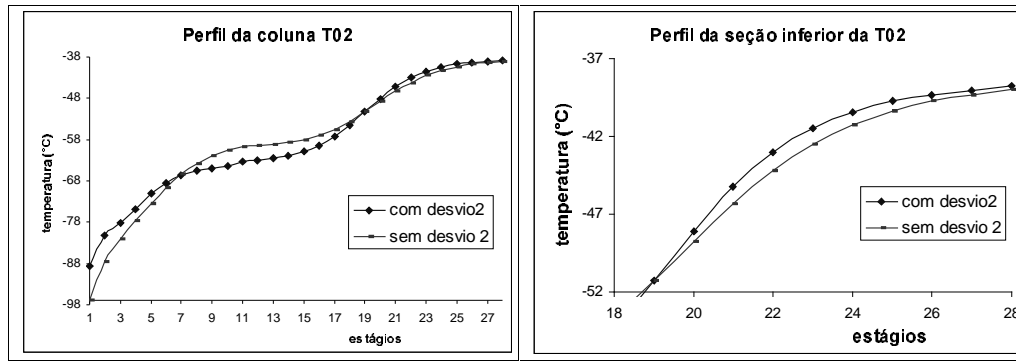


Figura 5.14: Perfil de temperatura da coluna T02, com e sem a utilização do desvio 2. A malha de controle do teor do metano no produto de fundo permaneceu aberta, e a temperatura controlada foi mantida num valor constante.

É interessante observar que mesmo que a temperatura do último prato da coluna entre os dois casos pareça insignificante (cerca de 0,2 °C), ela representa muito em termos de teor de metano no fundo da coluna (com desvio 2 = 301 ppm mol e sem desvio 2 = 581 ppm mol).

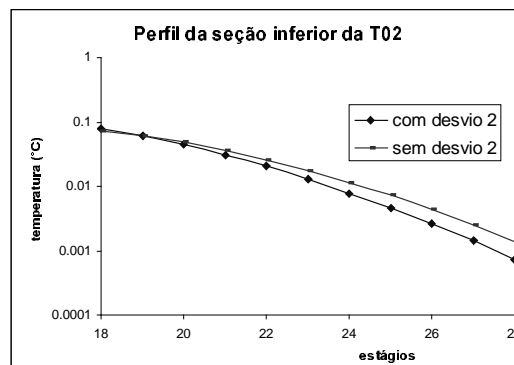


Figura 5.15: Perfil da composição do metano na fase líquida da região inferior da coluna T02. Para facilitar a visualização, a escala da ordenada é logarítmica, devido à grande variação na composição de metano entre o prato 18 e o 28.

Após a comparação dos resultados de simulação e de dados da planta real em três situações diferentes, que foram a operação estável da unidade e duas situações de aumento de carga da unidade acompanhada da abertura do desvio 1 e do fechamento parcial do desvio 2, pode se verificar que a simulação dinâmica está representando satisfatoriamente o comportamento da unidade, principalmente no que tange às colunas T01 e T02, que estão ligadas diretamente a problemática da unidade. Sendo assim este modelo está apto a ser utilizado no estudo da estrutura de controle atualmente utilizada pela planta e na definição de novas estruturas que podem vir a serem implementadas, com o objetivo de aumentar a produção do corte C2+ da unidade.

Como a restrição real da unidade está ligada a problemas hidráulicos, verificados principalmente na coluna T02, o próximo capítulo desta dissertação fará uma análise dos fatores que determinam a inundação de colunas de fracionamento, para que venham a ser utilizados como limites de operação, que auxiliem na análise das estruturas de controles propostas.

Capítulo 6

Hidráulica de colunas de pratos

Este capítulo aprofunda o estudo da situação hidráulica de colunas de pratos, com o objetivo de entender melhor o mecanismo que está restringindo a carga de processamento da unidade desmetanizadora. O assunto está disposto em três seções, sendo que a primeira introduz conceitos básicos sobre colunas de pratos, a segunda apresenta os mecanismos de inundação e correlações empíricas utilizadas na sua predição, e a terceira discute meios de definição do mecanismo de inundação para colunas reais.

6.1 Características básicas de uma coluna de pratos

As colunas de fracionamento são vasos de pressão cilíndricos verticais, contando com elementos internos que promovem o íntimo contato entre as fases líquida e vapor de modo que ocorra a transferência de massa e energia entre eles.

Quanto ao tipo de internos as colunas podem ser de pratos ou recheadas. As colunas de pratos apresentam em sua grande maioria escoamento do tipo de fluxo cruzado (cross-flow), no qual o líquido proveniente do prato superior é alimentado numa extremidade do prato, fluindo horizontalmente sobre a bandeja, em direção ao vertedouro, por onde acaba transbordando pelo downcomer escoando por gravidade para o prato inferior (figura 6.1). O vapor, por sua vez, flui do fundo para o topo da coluna, devido ao gradiente de pressão, atravessando as aberturas das bandejas, borbulhando no líquido, promovendo o íntimo contato entre as fases.

O líquido ao ser percolado pelo gás, forma uma região que se assemelha a uma emulsão gás-líquido, denominada de líquido aerado. Idealmente, numa coluna de pratos, o líquido descerá somente pelo downcomer, enquanto que o gás atravessa os pratos apenas pelas suas aberturas. Sendo assim, o downcomer apresenta duas regiões típicas, a superior, quando o vapor vai se desprendendo do líquido aerado, que vai se assentando, e a inferior, que contém o chamado líquido claro, que é o líquido sem vapor, que flui para a bandeja inferior. A figura 6.2 ilustra estas regiões.

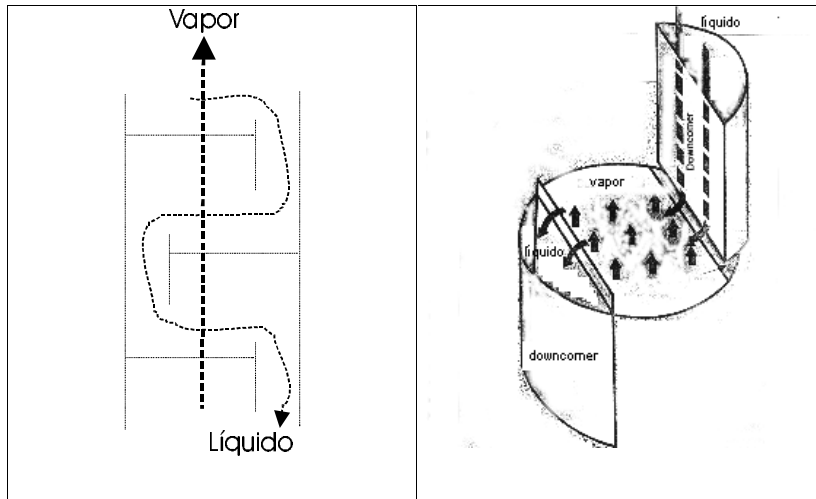


Figura 6.1: Representações esquemáticas do fluxo do tipo cruzado (crossflow).

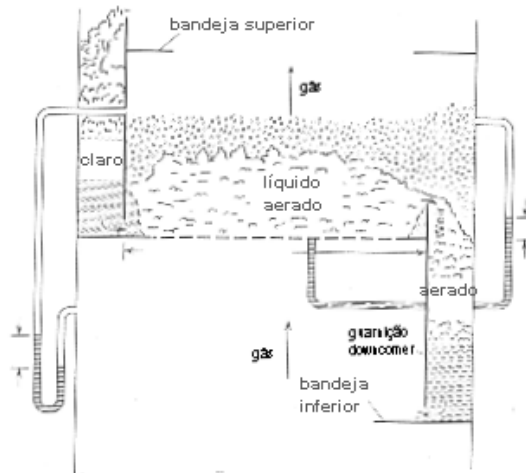


Figura 6.2: Prato de fracionamento indicando a região do líquido aerado, sobre a bandeja e no topo do downcomer, e do líquido claro, que é encontrado na base do downcomer.

Em uma coluna de pratos, o contato entre o líquido e o vapor é obtido as custas de uma elevada perda de carga, quando da passagem do vapor pela abertura das bandejas, e em seguida através do líquido. Comparando-se com as colunas recheadas, estas últimas têm uma perda de carga bem inferior, pois nelas o líquido e o gás fluem em contracorrente, e a energia despendida corresponde à necessária para que o gás atravesse o leito, vencendo o arraste provocado pelo leito e pelo líquido descendente, não havendo gasto excessivo de energia para que se promova o borbulhamento do gás.

Em torres recheadas, a superfície de troca térmica corresponde à película de líquido que desce pelas paredes do recheio. Apesar das vantagens em termos de custos energéticos, resultante da perda de carga de uma coluna recheada ser bem menor do que a de uma coluna de pratos, este tipo de equipamento apresenta algumas restrições operacionais, como a má distribuição de líquido pelo leito, formação de caminhos preferenciais, ou a impossibilidade

de sua utilização para pressões superiores a faixa de 5 atmosferas, quando os recheios começam a se danificar. Como a planta industrial estudada possui quatro colunas de pratos, somente este tipo de equipamento será enfocado e detalhado daqui por diante.

Uma dos fatores que distinguem as colunas de pratos é o tipo de aberturas que eles possuem, quanto a este aspecto pode-se ter basicamente três tipos:

1. Pratos com borbulhadores:

Os borbulhadores são dispositivos semelhantes a chaminés recobertos por tampas que são uma espécie de copo invertido. O vapor passa pela chaminé, alcança a tampa, onde a direção do fluxo é invertida e acaba borbulhando no líquido, após passar pelas aberturas laterais dos borbulhadores. Este tipo de pratos são muito antigos e muito pouco usados hoje em dia, aconselhado somente para casos nos quais se queira garantir a existência de nível de líquido nas bandejas. A figura que segue retrata-os melhor.

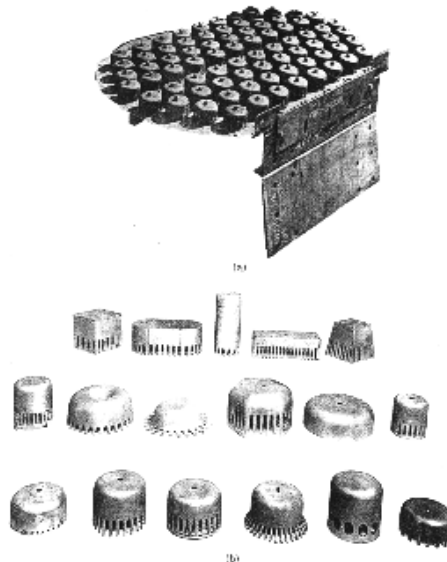


Figura 6.3: Pratos com borbulhadores. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).

2. Pratos perfurados:

Este tipo de prato é o de mais fácil fabricação, sendo também o mais barato, consistindo simplesmente numa bandeja perfurada. Apresentam baixa perda de carga, mas têm desvantagens como a ocorrência acentuada de vazamento de líquido através dos furos, o que determina uma baixa flexibilidade de operação, visto que não pode ser operado com vazões de vapor e líquido, muito diferentes das projetadas, veja a figura 6.4.



Figura 6.4: Pratos perfurados. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).

3. Pratos valvulados:

Este tipo de abertura é a mais usada hoje em dia, que é uma espécie de válvula que se abre para dar passagem ao vapor, porém com uma perda de carga bem menor. Estas mesmas válvulas, a exemplo dos borbulhadores, têm a capacidade de barrar a descida do líquido, veja a figura abaixo.

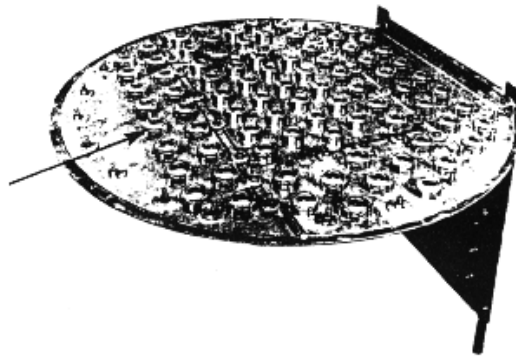


Figura 6.5: Pratos valvulados. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).

Os fluxos proporcionados por cada uma das aberturas são representados na figura 6.6.

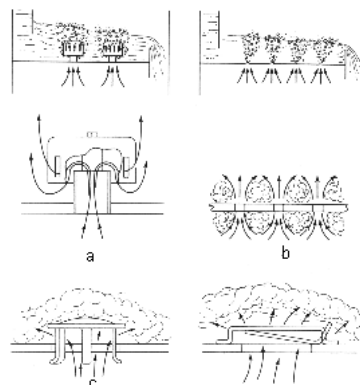


Figura 6.6: Fluxo de vapor através das aberturas dos pratos, (a) borbulhadores, (b) perfurados e (c) valvulados. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).

Os regimes de escoamento observados sob as bandejas, na região na qual o gás atravessa o líquido são definidos pelos tipos de aberturas, vazões dos fluidos, entre outros fatores. A seguir serão descritos cinco tipos de regimes constatados para pratos perfurados, conforme estudados por Lockett (1986). A figura 6.7 ajuda a visualização.

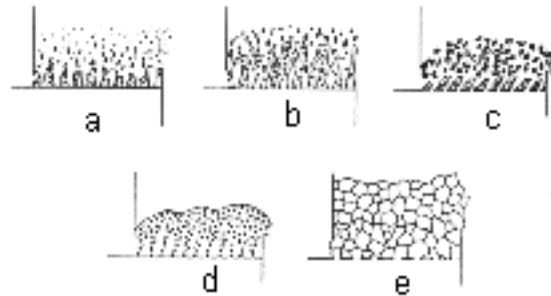


Figura 6.7: Regimes de fluxo comuns em pratos de destilação. (a) tipo bolha, (b) tipo espuma estável, (c) tipo froth, (d) tipo spray, (e) tipo emulsão. Ilustração retirada de (Seader e Hemley, 1998).

(a) Regime tipo bolha: ocorre quando há baixa vazão de gás, que passa na forma de bolhas através do líquido, sem agitá-lo excessivamente. Dificilmente encontrado em aplicações industriais.

(b) Regime tipo espuma estável: percebe-se a formação de um tipo de espuma estável, fazendo com que bolhas formadas na abertura da bandeja subam até a superfície sem estourar, prejudicando a transferência de massa. Ocorre a baixas vazões de gás, em colunas de pequeno diâmetro que possibilitam a estabilização da espuma pelo contato com as paredes. Este tipo de regime é pouco encontrado em colunas industriais.

(c) Regime tipo froth: Neste caso seqüências de bolhas deixam os orifícios borbulhando vigorosamente através do líquido, em movimentos aleatórios que promovem uma boa superfície de troca. Este é o regime mais comum nas plantas industriais, sendo razoavelmente bem estudado e modelado.

(d) Regime tipo spray: Este regime ocorre quando a vazão de vapor cresce e a vazão de líquido é relativamente baixa. Neste caso, ao contrário do demais regimes, a fase contínua é o vapor, enquanto o líquido constitui a fase dispersa, na forma de gotas. A elevada vazão de vapor sai das aberturas na forma de jatos, acabando por atomizar o líquido sobre a bandeja, parte deste líquido é arrastado para a bandeja superior, enquanto o restante se desprende, caindo de volta ao prato. Este regime também é facilmente encontrado em algumas colunas reais, como é o caso dos pratos de topo da coluna T03 da unidade desmetanizadora.

(e) Regime tipo emulsão: Quando as vazões de líquido são muito elevadas e as vazões de vapor relativamente baixas, o líquido acaba por arrastar lateralmente os jatos e as seqüências de bolhas, quebrando-as em bolhas menores, que acabam formando uma emulsão bastante uniforme e estável com o líquido. Na prática industrial, este fenômeno é observado em colunas que operam sob alta pressão e alta vazão de líquido.

As bandejas de uma coluna de pratos possuem algumas áreas características que são muito importantes para o seu desempenho. Basicamente um prato tem as seguintes regiões:

Área total da coluna (A_t): área total da seção transversal interna da coluna, ou área total da bandeja.

Área de borbulhamento (A_b): área da bandeja que contém as aberturas.

Área do downcomer (A_d): área da bandeja ocupado pelos downcomer. Existem duas áreas relativas ao downcomer numa mesma bandeja, uma denominada área de selagem do downcomer, que corresponde a área ocupada pelo downcomer que traz o líquido do prato superior. A outra área é a área de entrada do downcomer, que corresponde a abertura por onde transborda o líquido para a bandeja inferior.

Para se definir a área ocupada pelo downcomer (A_d), e/ou a área de borbulhamento de uma coluna, algumas dimensões característica do prato devem ser conhecidas, que são:

- Diâmetro da coluna (D_t)
- Comprimento do vertedouro (L_w)
- Largura do vertedouro (W_w)

A figura 6.8 expressa melhor estas dimensões e áreas características do prato.

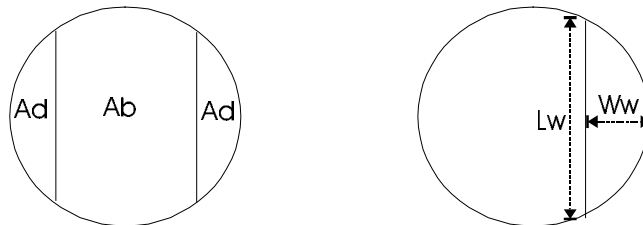


Figura 6.8: Representação esquemática de áreas e dimensões características de uma bandeja de passe simples.

Em Kyster (1992), pg. 343, é apresentado uma relação gráfica através da qual, sabendo-se as dimensões características da coluna (L_w e/ou W_w) e o diâmetro da coluna (D_t), pode-se calcular a fração da área da bandeja que é ocupada pelo downcomer e pela área de borbulhamento (A_d e A_b). A seguir serão definidas outras áreas da coluna, que serão úteis nos cálculos de predição do ponto de inundação.

Área ativa (A_n): é a área transversal da coluna disponível para que o vapor suba em direção a próxima bandeja, corresponde a área total da coluna menos a área ocupada pelo downcomer que desce do prato superior:

$$A_n = A_t - A_d \quad (6.1)$$

Área dos furos (A_h): corresponde a área total das aberturas de uma bandeja de pratos perfurados, ou seja, a área total disponível para a passagem do vapor pela bandeja.

Área slot (A_s): corresponde a menor área de passagem de vapor através de uma bandeja de pratos valvulados.

Área open slot (A_{so}): corresponde a maior área de passagem de vapor através de uma bandeja de pratos valvulados, quando todas as válvulas estão inteiramente abertas.

Área fracional das aberturas (A_f): corresponde a fração da área de borbulhamento que corresponde a área de passagem do vapor. Numa bandeja de pratos valvulados pode ser calculada por:

$$A_f = \frac{A_s}{A_b} \quad (6.2)$$

Após a introdução de conceitos básicos de colunas de pratos valvulados com fluxo cruzado e de algumas características básicas de projeto, será iniciado a caracterização dos mecanismos que delimitam a zona de operação satisfatória, dando-se atenção especial aos mecanismos de inundação.

6.2 Mecanismos de inundação de uma coluna de pratos

Inicialmente será apresentado o diagrama de desempenho típico dos pratos de uma coluna na figura 6.9, que relaciona a região de operação estável da coluna com a vazão de vapor e de líquido, citando quais são os mecanismos que podem limitar esta região conforme discutido por Yanagi (1990).

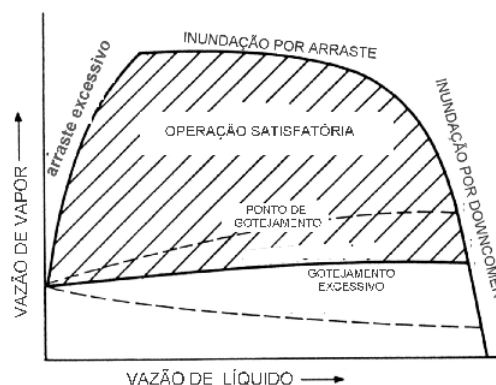


Figura 6.9: Diagrama típico de desempenho de um prato de uma coluna de fracionamento.

Três mecanismos básicos limitam a região de operação satisfatória das bandejas.

Arraste excessivo

Ocorre quando se opera com baixas vazões de líquido e elevadas vazões de vapor. A velocidade excessiva do vapor arrasta o líquido para a bandeja superior, não permitindo que ele escoe para o fundo da coluna.

Gotejamento excessivo

Refere-se à descida do líquido através das perfurações do prato. Este fenômeno é mais acentuado a baixas vazões de vapor, sendo mais crítico para pratos do tipo perfurados, diminui a eficiência da separação.

Inundação

A inundação pode ser causada por deficiência de área ativa (arraste), ou por deficiência de área no downcomer (inundação por choque, ou backup). A seguir serão detalhados cada um destes mecanismos, bem como apresentados correlações de predição. Em (Kister, 1992) é feita uma ampla discussão sobre o assunto, nesta seção será abordado este tema, porém de forma direcionada para coluna de pratos valvulados, utilizados nas colunas das unidades em estudo.

6.2.1 Inundação por arraste (*jet flooding*)

Este tipo de inundação ocorre quando há deficiência de área de borbulhamento, fazendo que a velocidade do vapor seja muito elevada, provocando arraste de excessiva quantidade de líquido. Isto faz com que a perda de carga no prato se eleve consideravelmente, assim como o retorno de líquido para a bandeja superior, sobrecarregando o downcomer, acabando por levar a coluna a inundação.

Fair propôs em 1961 uma correlação, reportada em (Kyster, 1992) que permite calcular a velocidade superficial de inundação do vapor (U_{mf}), a partir da qual o arraste excessivo de líquido irá levar a coluna à inundação. A figura 6.10 mostra esta correlação.

A abcissa do gráfico é o parâmetro de fluxo (Fl_v , adimensional), calculado por:

$$Fl_v = \frac{L}{G} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,5} \quad (6.3)$$

onde:

L é a vazão de líquido, lb/h,

G é a vazão de vapor, lb/h,

ρ_l é a densidade do líquido, lb/ft³,
 ρ_g é a densidade do vapor, lb/ft³,

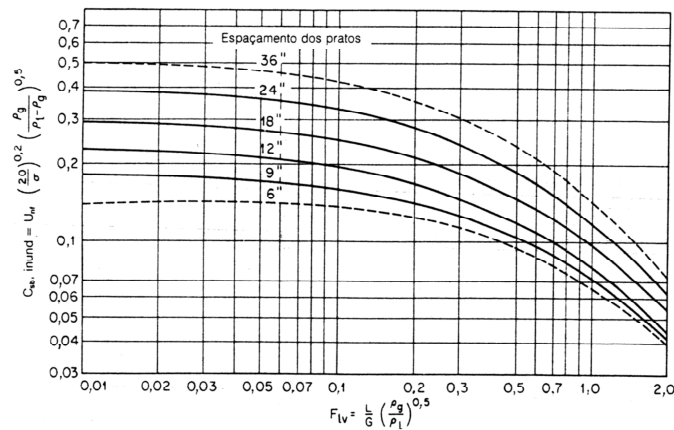


Figura 6.10: Correlação de Fair na previsão da inundação por arraste. Cada curva corresponde a um espaçamento, em polegadas, entre os pratos. Ilustração retirada do Perry et al. (1986).

A ordenada do gráfico traz o fator de inundação (C_{sb} , ft/s), a partir do qual se encontra a velocidade superficial de inundação do vapor (U_{mf} , ft/s), segundo a equação:

$$C_{sb} = U_{mf} \cdot \left(\frac{20}{\sigma} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} \right)^{0,5} \quad (6.4)$$

onde:

σ é a tensão superficial do líquido, dina/cm,

A percentagem de inundação por arraste, $(\%_{inun})_{ar}$, pode então finalmente ser calculada por:

$$(\%_{inun})_{ar} = 100\% \cdot \frac{U_s}{U_{mf}} \quad (6.5)$$

onde:

U_s é a velocidade superficial do gás na coluna, ft/s,

A velocidade superficial de gás na coluna é calculada pela divisão entre a vazão volumétrica do gás que passa pelo prato e a área ativa da bandeja (A_n).

Quando se realiza o projeto de uma coluna de pratos, a área ativa de uma coluna é definida de tal modo que a percentagem de inundação fique em 80%, ou seja, este é o valor típico de projeto para garantir o bom funcionamento da coluna.

Quando Fair propôs sua correlação de predição, ele apenas publicou suas curvas graficamente, visto que na época, os resultados eram retirados diretamente do gráfico. Atualmente, com o grande utilização dos computadores, a existência de funções que ajustassem as curvas, que pudessem ser pré-programadas automatizando a sistemática de cálculo seriam de muita valia. Neste sentido Kessler e Wankat (1988), apresentaram um trabalho sugerindo equações logarítmicas de três parâmetros, ajustando as curvas de Fair, para pratos perfurados. Foi apresentada também uma tabela que definia o valor destes parâmetros de acordo com o espaçamento entre os pratos.

Outro estudo focado no ajuste das curvas de Fair foi publicado por Lygeros e Magoulas, (1986). Neste caso foi sugerida uma equação de um único parâmetro, que corresponde ao espaçamento entre os pratos. Este método é mais simples de programar, porém não é citada na publicação uma comparação entre as curvas originais de Fair, e os resultados obtidos por este ajuste.

Através da comparação dos resultados obtidos por estas funções ajustadas e dos valores das curvas originais de Fair, foi constatado que em nenhum caso uma única curva conseguia ser bem ajustada em todas as regiões de valores de C_{sb} . Optou-se então por ajustar a curva correspondente ao espaçamento entre pratos de 24 polegadas, por duas funções diferentes, conforme os valores da abcissa (Flv), que são:

$$C_{sb} = -0,0823 \cdot \log(Flv) + 0,1417 \quad , \quad 0,1 < Flv < 0,5 \quad (6.6)$$

$$C_{sb} = -0,0907 \cdot \log(Flv) + 0,1255 \quad , \quad 0,8 < Flv < 2,0 \quad (6.7)$$

Como os pratos das colunas T01 e T02 estavam todos situados num deste dois intervalos, os ajustes das curvas por região mostraram-se muito mais precisos.

Observações posteriores levaram a conclusão de que a predição de Fair é um tanto conservativa em cerca de 10% a 20%, quando considerado o caso de pratos valvulados, conforme Seader e Hemley, (1998), que ilustra graficamente a comparação entre dados de colunas reais e a predição pelo método de Fair, veja a figura 6.11:

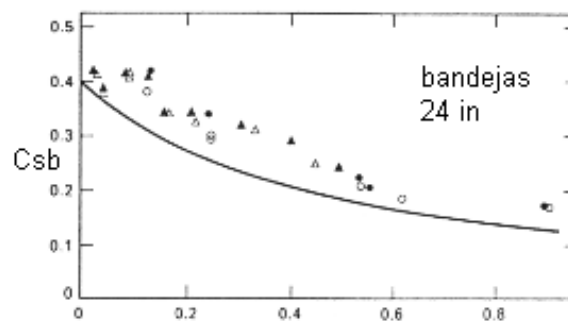


Figura 6.11: Comparação de dados de inundação de colunas reais, com os respectivos valores preditos por Fair, para pratos valvulados, com espaçamento de 24 in entre as bandejas, a abcissa é Flv . Ilustração de (Seader e Hemley, 1998).

Muitos estudos foram desenvolvidos visando desenvolver novas correlações que realizassem previsões mais aproximadas da situação real. Dentre eles, Kyster et al. (1990) sugeriram uma nova correlação para pratos valvulados. Conforme comparação com dados de planta real, os resultados preditos deixam de ser conservativos, passando a contar com um erro de cerca de 20%, para mais ou para menos.

Embora a inundação por arraste seja mais frequentemente verificada em colunas industriais, não é pouco comum de se observar casos de inundação por downcomer. A seguir serão estudados mais profundamente os mecanismos que causam este fenômeno.

6.2.2 Inundação no downcomer por choque (Downcomer choke flooding)

Quando é realizado o projeto da coluna, deve-se ter o cuidado de que o downcomer seja grande o suficiente para dar vazão ao líquido que desce, sem que se verifiquem perdas excessivas de energia por choque. Se as perdas por fricção na entrada do downcomer ou nas suas paredes for muito elevada, o líquido pode ter o seu escoamento prejudicado, fazendo com que ocorra um retorno para a bandeja superior, podendo levar a coluna à inundação.

A área de entrada no downcomer é dos fatores mais críticos neste tipo de inundação, pois é nesta região que o líquido apresenta seu maior grau de aeramento, tornando as perdas por fricção elevadas. Alguns critérios foram propostos para que se definisse a área de topo do downcomer, os mais populares são o de Glitsch (prediz as menores áreas), o de Koch (mais conservativo, predizendo as maiores áreas) e o de Nutter (meio termo entre os dois). Deve-se salientar que os resultados preditos por estas correlações não são muito confiáveis, chegando a ser sugerido, para casos de projeto, que se utilize um fator de segurança de 2.

Critério de Glitsch

Este critério define o fluxo máximo do líquido no downcomer, que corresponde a menor entre os três fluxos listados em 6.10:

$$Q_{dg1} = 41 \cdot (P_l - P_g)^{0,5} \quad (6.8)$$

$$Q_{dg2} = 7,5 \cdot (S \cdot (P_l - P_g))^{0,5} \quad (6.9)$$

$$Q_{dg} = \min\{250, Q_{dg1}, Q_{dg2}\} \quad (6.10)$$

onde:

Q_{dg} é o fluxo volumétrico de líquido no downcomer, gpm/ft²,

S é o espaçamento entre os pratos, em polegadas,

A percentagem de inundação de Glitsch, $(\% \text{ _inun})_g$, é então calculada pelo fluxo volumétrico real de líquido no downcomer (Q_{dr} , gpm/ft²), dividido pelo máximo calculado por Glitsch, segundo:

$$(\% \text{ _inun})_g = 100\% \cdot \frac{Q_{dr}}{Q_{dg}} \quad (6.11)$$

Se a percentagem ultrapassar 100 %, o critério caracterizaria a ocorrência de inundação.

Critérios de Koch e Nutter

Nestes critérios, o fluxo máximo de líquido no downcomer é definido por um tempo de residência mínimo no seu interior, de acordo com as equações:

$$Q_{dk} = 448,8 \cdot \left(\frac{S}{12 \cdot trk} \right) \cdot SF \quad (6.12)$$

$$Q_{dn} = 448,8 \cdot \left(\frac{S}{12 \cdot trn} \right) \cdot SF \quad (6.13)$$

onde:

Q_{dk} é fluxo volumétrico máximo de líquido no downcomer calculado por Koch, gpm/ft²,

Q_{dn} é fluxo volumétrico máximo de líquido no downcomer calculado por Nutter, gpm/ft²,

trn é o tempo de residência do líquido no downcomer para Nutter, segundos,

trk é o tempo de residência do líquido no downcomer para Koch, segundos,

SF é o fator empírico de desaeração, adimensional,

O fator SF pode ser encontrado numa tabela, que lista valores sugeridos para vários casos de processo, em (Kyster, 1992, pg. 282). Valores para trn e trk podem ser definidos segundo a figura 6.12.

A percentagem de inundação por choque no downcomer, pelos critérios de Glitsch, Nutter e Koch, podem então ser calculadas de acordo com a equação generalizada listada abaixo, observe que o índice “i” pode ser substituído por qualquer um dos três critérios.

$$(\% \text{ _inun})_i = 100\% \cdot \frac{Q_{dr}}{Q_{di}} \quad (6.14)$$

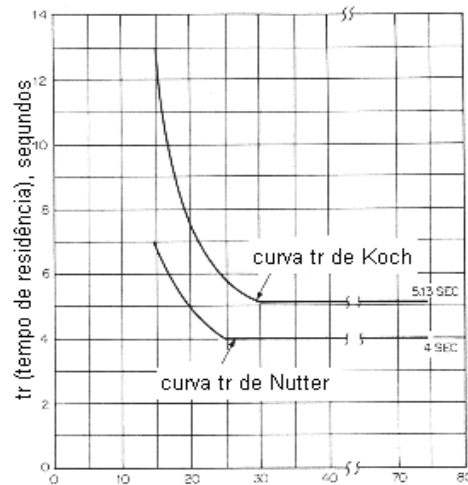


Figura 6.12: Valores de t_{rn} e t_{rk} , a abscissa do gráfico é a diferença das densidades do líquido e do vapor, ou seja $(\rho_l - \rho_g)$ (lb/ft³). Ilustração retirada do (Kyster, 1992).

6.2.3 Inundação no downcomer do tipo backup

Este tipo de inundação ocorre quando a coluna de líquido aerado no downcomer (h_{dc}') supera a soma do espaçamento entre os pratos (S) e a altura do vertedouro (h_w), fazendo com que o líquido se acumule na bandeja superior, levando a coluna a inundação. Então para que isto não ocorra, a seguinte relação deve ser respeitada:

$$h_{dc}' < S + h_w \quad (6.15)$$

Sendo que h_{dc}' (em polegadas de líquido) é calculado por:

$$h_{dc}' = \frac{h_{dc}}{\phi_{dc}} \quad (6.16)$$

neste caso:

h_{dc} é a altura total que teria a coluna de líquido no downcomer, caso ele fosse claro, e não aerado, em polegadas de líquido,

ϕ_{dc} é o fator adimensional de aeração no downcomer, encontrado em Kyster (1992, pg. 287),

A coluna de líquido formada no downcomer é responsável pelo escoamento de líquido para a bandeja inferior, visto que devido ao gradiente de pressão da coluna, o prato inferior possui uma pressão superior a do prato de cima. A altura da coluna deve ser tal que o líquido consiga vencer a perda de carga entre os pratos, e a perda de carga do escoamento de líquido no downcomer. Três parcelas definem então a altura da coluna de líquido no downcomer, como mostra a equação abaixo, em termos de altura de líquido claro :

$$h_{dc} = h_c + h_t + h_{da} \quad (6.17)$$

que são:

h_c corresponde a altura do líquido no prato inferior, polegadas de líquido,

h_t corresponde a perda de carga no prato, ou seja, a diferença de pressão entre as duas bandejas, polegadas de líquido,

h_{da} corresponde a perda de carga no downcomer, polegadas de líquido,

A figura 6.13 ilustra melhor estas três parcelas na constituição da altura de líquido claro no downcomer:

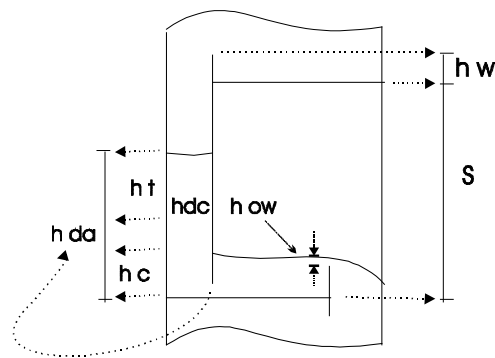


Figura 6.13: Representação esquemática da altura do líquido claro no downcomer e dos fatores que contribuem.

A seguir serão detalhados os cálculos destes três termos:

Perda de carga no downcomer (h_{da})

As maiores perdas por fricção no downcomer correspondem a passagem do líquido pela menor abertura. Para muitos casos, esta região está situada abaixo da guarnição do próprio downcomer, conforme indicado na figura 6.13. A perda de carga nesta passagem é calculada através de uma equação derivada da utilizada em cálculos da perda de carga de um líquido, pela passagem numa placa de orifício, ou seja:

$$h_{da} = 0,03 \cdot \left(\frac{GPM}{100 \cdot A_{da}} \right)^2 \quad (6.18)$$

A_{da} é a menor área de passagem do líquido no downcomer, ft^2 ,

GPM é a vazão volumétrica de líquido no downcomer, gpm,

h_{da} é a perda de carga pela passagem do líquido no downcomer, polegadas de líquido,

Altura de líquido no prato inferior (h_c)

A h_c é calculada pela soma de três alturas, conforme:

$$h_c = h_w + h_{ow} + h_{hg}/2 \quad (6.19)$$

h_w é a altura do vertedouro, polegadas de líquido,

h_{ow} é a altura de líquido sobre o vertedouro, polegadas de líquido,

$h_{hg/2}$ é a altura que corresponde a metade do gradiente do nível do líquido ao longo do prato, polegadas de líquido,

h_c é a altura de líquido no prato inferior, polegadas de líquido,

O termo $h_{hg/2}$ pode ser considerado nulo, e h_w é característica do projeto da coluna. Já o termo h_{ow} é calculado por:

$$h_{ow} = 0,48 \cdot F_w \cdot (Ql)^{2/3} \quad (6.20)$$

Ql é a vazão volumétrica do líquido por unidade de comprimento do vertedouro (lw), com unidades em gpm/polegada comprimento de vertedouro,

F_w é o fator adimensional de correção da fórmula, calculado conforme a figura 6.14:

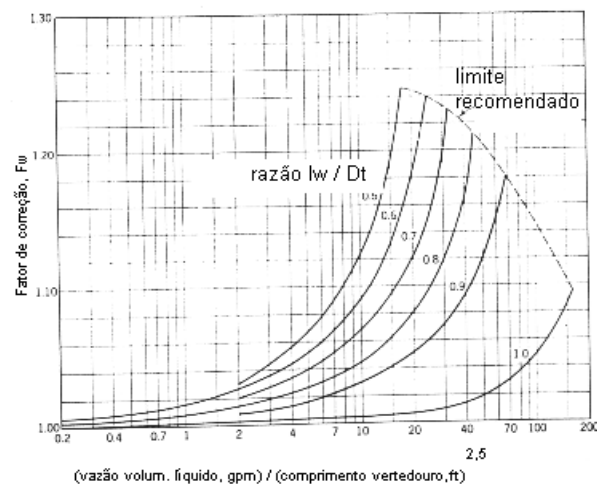


Figura 6.14: Fator de correção F_w , para pratos de um passe. Ilustração retirada de (Kyster, 1992).

A abcissa é calculada pela divisão da vazão volumétrica do líquido, em gpm, e o comprimento do vertedouro, que neste caso é medido em ft. O parâmetro das curvas é a relação entre o comprimento do vertedouro e o diâmetro da coluna.

Altura referente à perda de carga no prato (ht)

A perda de carga no prato pode ser dividida em duas parcelas:

$$ht = h_d + h_l \quad (6.21)$$

h_d é a perda de carga pela passagem do vapor através das aberturas da bandeja, polegadas de líquido,

h_l é a perda de carga pela passagem do vapor através do líquido aerado, polegadas de líquido,

h_t é a perda de carga total pela passagem do vapor através da bandeja, polegadas de líquido,

O termo h_d , para pratos valvulados, pode ser calculado segundo a figura abaixo:

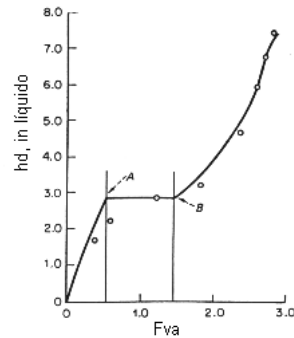


Figura 6.15: Cálculo do h_d para pratos valvulados. Ilustração retirada do (Kyster , 1992).

Na abcissa deste gráfico aparece o fator F_{va} , calculado por:

$$F_{va} = u_b \cdot (\rho_g)^{0,5} \quad (6.22)$$

onde:

u_b é a velocidade superficial do gás, baseada na área de borbulhamento (A_b), em ft/s,

A perda de carga pela passagem do vapor através do líquido aerado, (h_l), pode ser calculada por:

$$h_l = \beta \cdot h_c \quad (6.23)$$

β é o fator de aeração adimensional, calculado segundo a figura 6.16.

Após os cálculos de todas as parcelas que permitem o cálculo da h_{dc} , utilizando-se a equação 6.17, e o posterior cálculo de h_{dc}' , pela equação (6.16), pode-se definir a percentagem de inundação no downcomer do tipo backup, $(\% \text{ _inun})_{db}$, por:

$$(\% \text{ _inun})_{db} = 100\% \cdot \frac{h_{dc}'}{S + h_w} \quad (6.24)$$

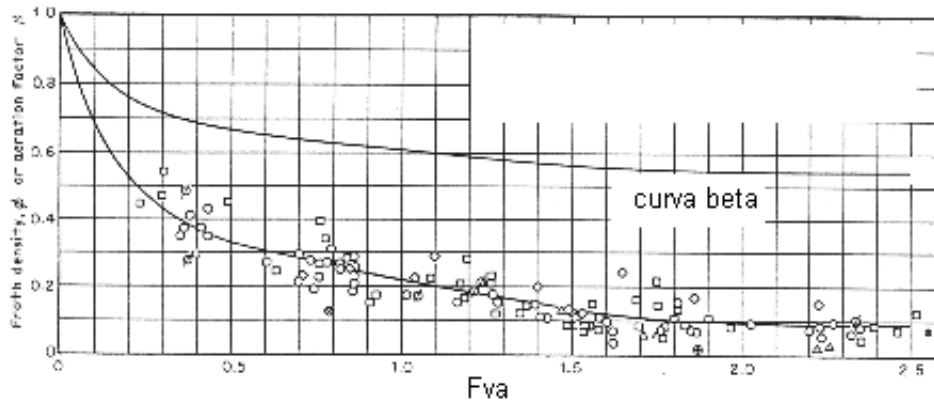


Figura 6.16: Cálculo do fator de aerção adimensional, β , para pratos valvulados, segundo a curva superior do gráfico.

6.3 Análise de colunas reais quanto a inundação

Quando se avalia um caso de uma coluna real que está apresentando problemas de inundação, a utilização das correlações empíricas expostas anteriormente é muito importante, porém sabe-se que elas não são absolutamente confiáveis, devido às suas imprecisões. É importante então, que se atente para outros fatores operacionais, que venham a confirmar, ou não, o que foi concluído com base nas correlações.

A definição do ponto de inundação da coluna, (*flooding point*), feito por Harrison e France, (1989), como a região da coluna onde a inundação se inicia, é muito importante, pois sabendo-se quais as bandejas que apresentam problemas hidráulicos, com o auxílio das correlações empíricas, fica mais fácil diagnosticar qual o mecanismo de inundação. A inundação também define a máxima capacidade hidráulica de uma coluna, que é a máxima carga que o equipamento pode processar, sem inundar. Alguns sinais operacionais são capazes de indicar a ocorrência de inundação, tais como:

- Constatação de ocorrência de ondas de líquido arrastado no topo da coluna.
- Oscilação da perda de carga medida da coluna.
- Flutuações no nível de fundo da coluna.
- Elevação no perfil de temperatura da coluna.
- Queda do nível de fundo, ou redução da vazão do produto de fundo da coluna.

O mecanismo de inundação é afetado diretamente pela pressão de operação da coluna e a relação entre as vazões de líquido e vapor (L/V). Um diagrama foi proposto em (Kyster, 1992), relacionando estes dois fatores, com o tipo de inundação, representado na figura 6.17.

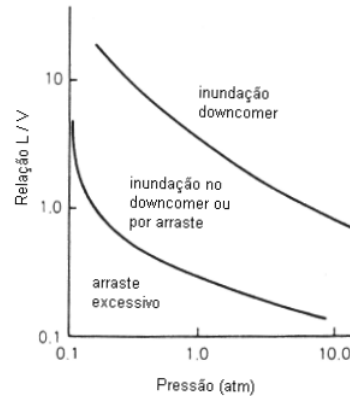


Figura 6.17: Diagrama qualitativo relacionando a pressão de operação da coluna, a relação L/V e o mecanismo que define a inundação.

De modo geral, verifica-se que para colunas que operem com baixas pressões e/ou baixas vazões relativas de líquido, ocorre a inundação por arraste. A inundação por downcomer ocorreria mais em casos de pressões mais elevadas, com altas vazões de líquido e vapor. Porém o diagrama expresso na figura 6.17 é um tanto grosseiro, e a posição das curvas varia, conforme o sistema que se está estudando.

A figura 6.18 mostra a dificuldade de se definir o tipo de inundação para uma coluna que opere sob pressões moderadas, e com uma relação L/V tal que a coloque numa região de fronteira entre os mecanismos de inundação por arraste e inundação por backup, quando ocorre o aumento da vazão de líquido e/ou de vapor, como discutido por Xu et al., (1998).

Como mostra a figura 6.18, a partir de um ponto de operação satisfatório, a vazão de vapor pode ser aumentada de modo independente, como mostra a linha tracejada vertical, até a inundação por arraste. Também pode-se aumentar somente a vazão de líquido, como mostra a linha tracejada horizontal, até a inundação por downcomer. Se as vazões de líquido e vapor forem elevadas de maneira proporcional, como mostra a linha tracejada inclinada, o mecanismo de inundação que definirá a inundação pode ser tanto por arraste, como por downcomer.

Uma ferramenta muito utilizada atualmente na análise da situação hidráulica de uma coluna é o aparelho de varredura de raios Gama (Gamma Scanner). Este equipamento tem a capacidade de analisar a situação da coluna durante a operação, podendo identificar regiões com problemas hidráulicos, danos acentuados nas bandejas da coluna, e até o ponto de inundação, caso ele venha a ocorrer durante a varredura. A figura 6.19, publicada em (Harrison e France, 1989, part 1) mostra o resultado de uma varredura típica de uma coluna de pratos.

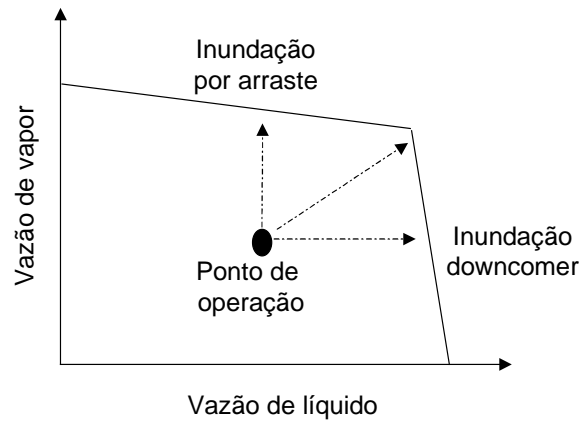


Figura 6.18: Mecanismo de inundação de uma coluna de pratos após a subida da vazão de vapor e/ou subida da vazão de líquido.

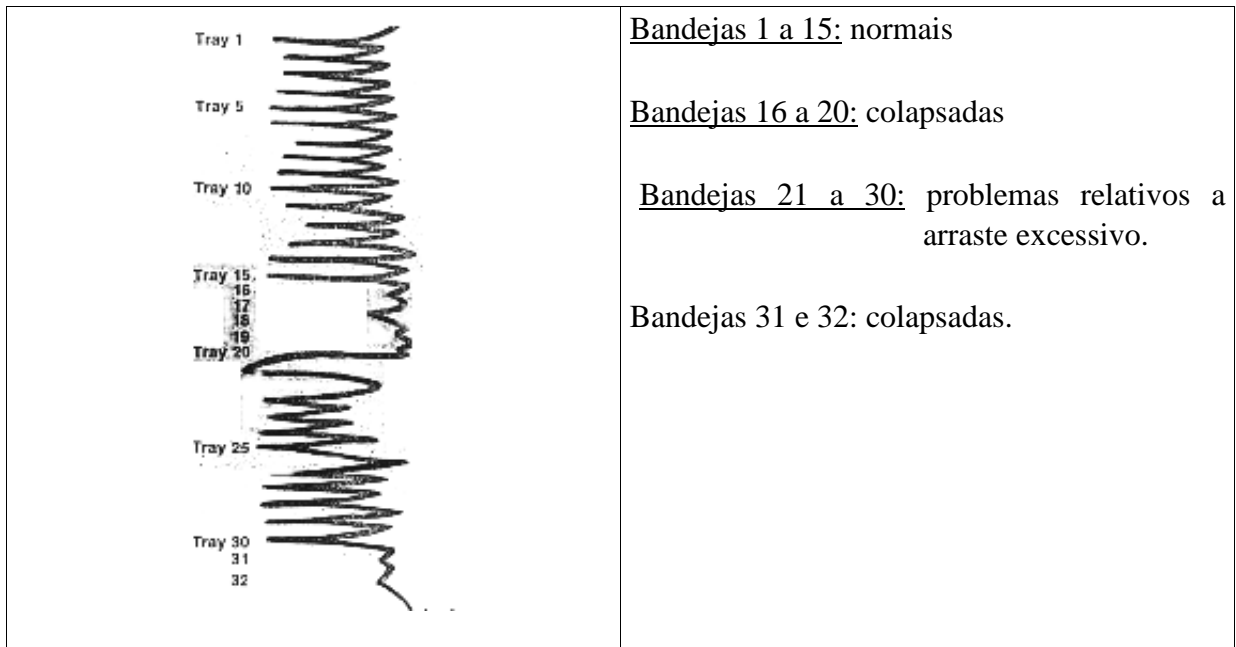


Figura 6.19: Resultado típico de uma varredura realizada em uma coluna de pratos. Ilustração retirada de (Harrison e France, 1989, part 1).

Ilustrando o potencial do *Gamma Scanner*, Xu et al., (1998), mostram os resultados de três varreduras realizadas numa mesma coluna, sob três cargas de operação diferentes, conforme reproduz a figura 6.20.

Na operação sob a vazão de projeto, observam-se regiões claras acima das bandejas. No caso de operação com vazão de carga mais elevada, de 120% da vazão de projeto, pode-se perceber o aumento da região ocupada pelas gotas de líquido (mais escura). Por fim, no terceiro caso, começa a ocorrer o arraste excessivo de líquido para o prato superior, principalmente no prato de carga, configurando o ponto de início da inundação.

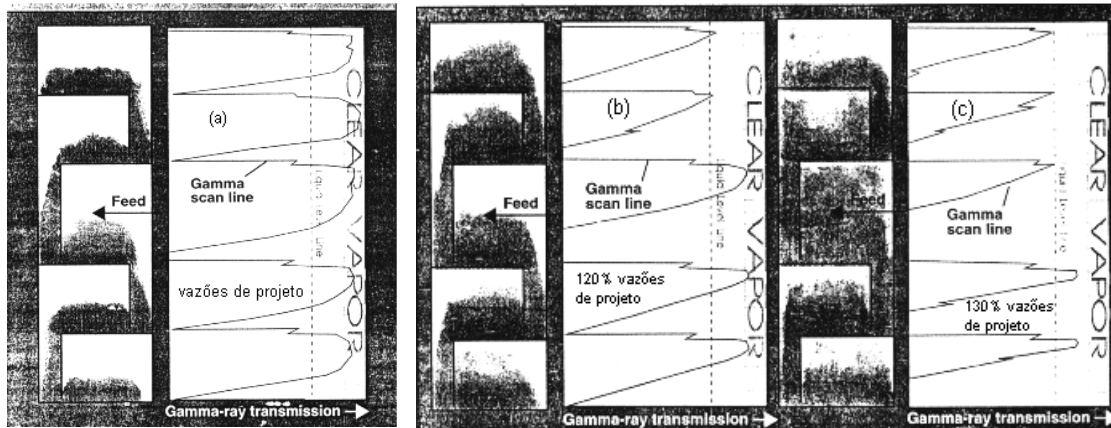


Figura 6.20: Varredura em uma mesma coluna operando sob três vazões de carga diferentes, a carga da coluna está indicada por *feed*. (a) vazão de projeto, (b) 120% da vazão de projeto, (c) 130% da vazão de projeto, correspondendo ao ponto de inundação. Ilustração retirada de (Xu et al., 1998).

O diagrama de operação desta coluna poderia ser representado conforme a figura 6.21:

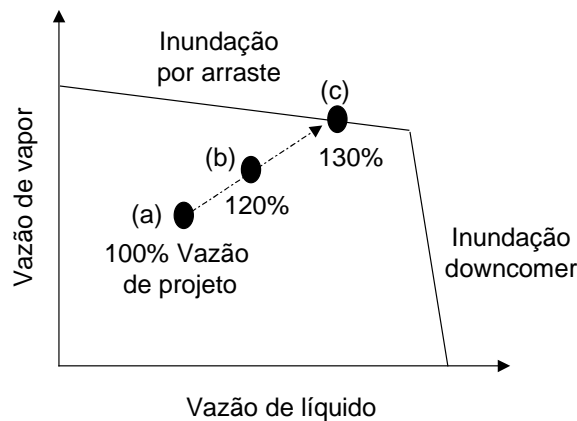


Figura 6.21: Diagrama de operação da coluna, com a representação das situações de vazão de carga analisados na varredura.

Outro procedimento registrado em (Harrison e France, 1989, part 3), sugere que, a partir de um ponto de operação satisfatório, eleve-se a carga da coluna, até que se atinja o seu ponto de inundação, acompanhando-se o comportamento da perda de carga da coluna, nível de fundo, refluxo de topo e outras variáveis operacionais importantes. Caso a inundação seja precedida por uma diminuição na eficiência da coluna, que pode ser indicada por um aumento excessivo na vazão de refluxo de topo necessária para se manter a especificação de topo, ou ainda o aumento excessivo do arraste de líquido no topo, o mecanismo de inundação se dá por arraste.

Por outro lado, se a inundação for acompanhada de uma elevação brusca na perda de carga da coluna, sem que se tenham observados sinais prévios da sua perda de eficiência, provavelmente o mecanismo dominante se relaciona com inundação no downcomer.

A partir dos conceitos básicos expressos neste capítulo sobre mecanismos de inundação e sua predição, pode-se partir para a última etapa desta dissertação, que envolve a simulação de várias estruturas de controle propostas, e a comparação dos seus desempenhos, no que concerne a aumento da produção do corte C2+, com respeito às restrições hidráulicas da unidade.

Capítulo 7

Desempenho das estruturas de controle

Os capítulos anteriores desta dissertação se detiveram basicamente no entendimento da problemática da unidade e no estudo das restrições hidráulicas de colunas de pratos. Este capítulo então, realizará a comparação das soluções propostas, em relação ao seu desempenho quanto à produção do corte C2+, e à situação hidráulica resultante da coluna T02, que apresenta problemas de inundação para unidade operando a cargas altas.

7.1 Natureza da inundação

A primeira etapa da avaliação de um caso de inundação numa coluna de fracionamento de pratos é a definição do mecanismo causador desta inundação. De acordo com o diagrama expresso na figura 6.17, a qual relaciona o tipo de inundação com a pressão da coluna e a razão L/V de operação, a coluna T02 opera numa região na qual pode ocorrer inundação tanto por arraste, quanto no downcomer. A pressão de operação é de 12 kgf/cm^2 , enquanto que a relação L/V varia de 1 até 5, dependendo da região da coluna. Convém atentar para o fato de que este diagrama não é muito preciso, principalmente no que diz respeito aos limites entre os mecanismos de inundação.

A figura 7.1 traz os dados da planta para uma situação, já avaliada em capítulos anteriores, na qual a coluna T02 quase inundou, a partir deles, será feita uma análise mais detalhada do que se verificou operacionalmente, procurando definir o tipo de inundação.

Procedeu-se a subida da carga da unidade (figura 7.1 (a), entre 15 e 20 horas), quando a vazão passa de 195 ton/h até um pico de 205 ton/h. Neste momento a coluna T02 apresenta problemas de inundação (figura 7.1 (c)), evidenciados na elevação da perda de carga da unidade e nas oscilações verificadas no nível de fundo da coluna. A diferença de temperatura entre o topo e o fundo também aumenta nesta situação. Por volta de 20 horas, ocorreu um pico de temperatura da carga da unidade (figura 7.1 (b)), mas este evento não parece ter sido o causador da inundação, pois ele ocorreu após já terem se manifestado os sintomas desta inundação. As ações que evitaram a inundação completa da coluna de fracionamento foram a

diminuição da carga da unidade (de 205 ton/h para 202 ton/h) e a abertura do desvio 1 (figura 7.1 (d)).

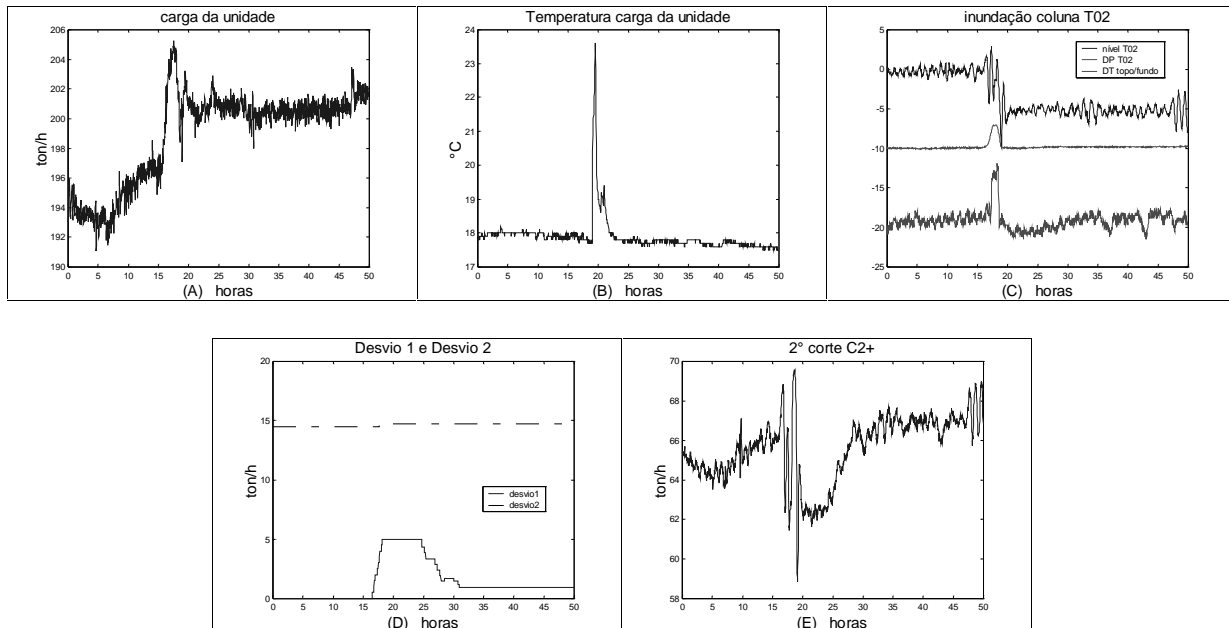


Figura 7.1: Dados de carga e indicativos da situação hidráulica da coluna T02, para uma situação operacional na qual esta coluna quase inundou. (a) carga total da unidade, (b) temperatura da carga da unidade, (c) variações do nível de fundo e das diferenças de pressão e de temperatura entre o topo e o fundo. Estas curvas foram deslocadas em 10 unidades para permitir uma melhor visualização. (d) desvio 1 (linha contínua) e desvio 2 (linha tracejada), (e) vazão do 2º corte C2+.

A figura 7.2 mostra o perfil de temperatura da coluna T02 durante este período. Observe que durante a situação hidráulica mais crítica (entre 17 e 20 horas), ocorreu um aumento na diferença de temperatura entre o topo e o fundo da coluna. Também pode ser verificado que o pico de temperatura da carga da unidade ocorre um pouco após a situação hidráulica da coluna atingir seu ponto mais crítico, portanto ele não teve influência na inundação da coluna. No período de 18 a 25 horas, quando o desvio 1 teve sua máxima vazão, constata-se que a diferença de temperatura entre o topo e o fundo diminuiu levemente.

A figura 7.3 mostra que durante a inundação da coluna T02, verificou-se um pico no nível de fundo da coluna T04, que acaba provocando um aumento da vazão do reciclo de topo para a coluna T02. Como a vazão de fundo do vaso V06, que é a alimentação principal da coluna T04 não subiu, pode-se concluir que houve um arraste excessivo no topo da coluna T02, que é coletado na coluna T04. Como a elevação da perda de carga da coluna foi acompanhada por sinais indicando um aumento no arraste da coluna, então, conforme o discutido na seção 6.3, pode-se supor que a inundação seja causada pela escassez da área de borbulhamento, ou seja, que o mecanismo causador da inundação seja o arraste.

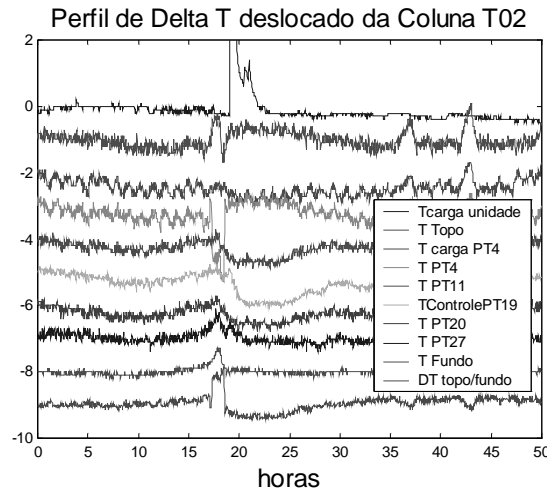


Figura 7.2: Perfil de temperatura da coluna T02 e outras temperaturas envolvidas na sua situação. Para permitir uma melhor visualização, graficou-se a variação das temperaturas em relação aos seus valores iniciais deslocadas de uma unidade entre si. As curvas estão na mesma ordem da legenda.

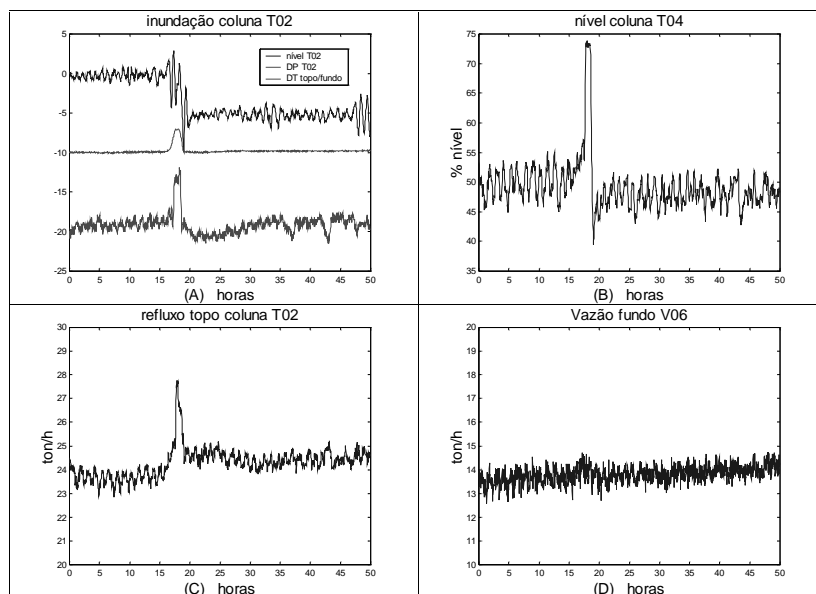


Figura 7.3: Dados operacionais da planta observados durante a inundação, que indicam que o mecanismo de inundação seja por arraste.

7.2 Desempenho das estruturas de controle

O próximo passo será a simulação da dinâmica da planta, através do modelo desenvolvido no Aspen Dynamics, para que se acompanhe o comportamento dinâmico da unidade frente a uma perturbação, que consiste na subida de carga da unidade, a qual passa de 190 ton/h para 200 ton/h. Foi realizada esta mesma perturbação para quatro situações operacionais diferentes da planta, que foram:

- *Projeto*: planta modelada segundo sua configuração original de projeto, sem a utilização dos desvios 1 e 2.

- *Atual*: planta operando conforme a configuração atual da planta, com a utilização dos desvios e 1 e 2.
- *Estrutura 1*: planta com as modificações propostas na estrutura de controle 1, envolvendo a mudança de alinhamento, conforme descrito na seção 3.4.2.
- *Estrutura 2*: planta com a estrutura de controle proposta 2, que utiliza o desvio 1 realocando parte da carga da coluna T02 para a coluna T01, de modo a manter constante a relação entre as cargas principais das colunas T01 e T02, conforme descrito na seção 3.4.2.

Numa primeira comparação, foram utilizadas as correlações empíricas apresentadas no capítulo 6, para se avaliar as condições hidráulicas das colunas T01 e T02, na nova situação estacionária após a subida de carga. Foram calculadas as percentagens de inundação por arraste, de inundação no downcomer por backup e de inundação no downcomer por choque (segundo o critério de Koch, que é o mais conservativo). A situação hidráulica da coluna T01 é bem mais tranquila, não apresentando histórico de inundações, e por este motivo, será avaliada apenas a inundação por arraste deste equipamento, para que se tenha uma sensibilidade do seu aproveitamento. A figura 7.4 mostra os resultados obtidos para as percentagens de inundação.

Pelo fato de todas as correlações propostas serem empíricas, possuindo razoável margem de erro, a melhor análise que se pode fazer é qualitativa, isto é, deve-se atentar mais para as relações entre as percentagens de inundação obtidas nas propostas analisadas, do que para os valores em si, verificando se a tendência é de melhora ou de piora.

Analisando-se os resultados das correlações de predição para inundação da coluna T02, pode-se constatar que a inundação por arraste parece ser a mais crítica, vindo ao encontro do que foi discutido na seção 7.1, inclusive se configura situação de inundação em algumas regiões. As seções da coluna que mais preocupam são a superior (do prato 5 ao 10) e a do fundo (a partir do prato 23), nestes casos as percentagens de inundação por arraste, calculadas pelo critério de Fair, ultrapassam o valor de 100%. Deve-se salientar que a correlação de Fair é conservativa e, dependendo do caso, o valor estimado por ela se distancia entre 10% e 20% do ponto de inundação real da coluna, conforme já apresentado na seção 6.2.1 (figura 6.11). Resultados de varredura de gama feitos nesta coluna indicam que a inundação começa no fundo. Se for este o caso, a inundação do tipo downcomer parece também preocupar, observe os resultados obtidos a partir do prato 25.

Analisando a coluna T02, não são observados grandes diferenças entre a situação de *projeto* e a *situação atual* na região inferior da coluna, não sendo possível explicar, através da figura 7.4, o porquê do uso dos desvios foi capaz de aliviar a situação hidráulica do sistema. Mas o fato é que a condição atual de operação (com o uso dos desvios 1 e 2) está conseguindo fazer com que a planta opere com uma carga de processamento mais alta que a obtida na situação de projeto. Acredita-se que isto só foi possível pelo *aumento da perda de eteno* na planta real, na *situação atual*, o qual não foi considerado na simulação dinâmica, uma vez que todos os casos simulados mantêm as mesma especificação nas correntes de saída.

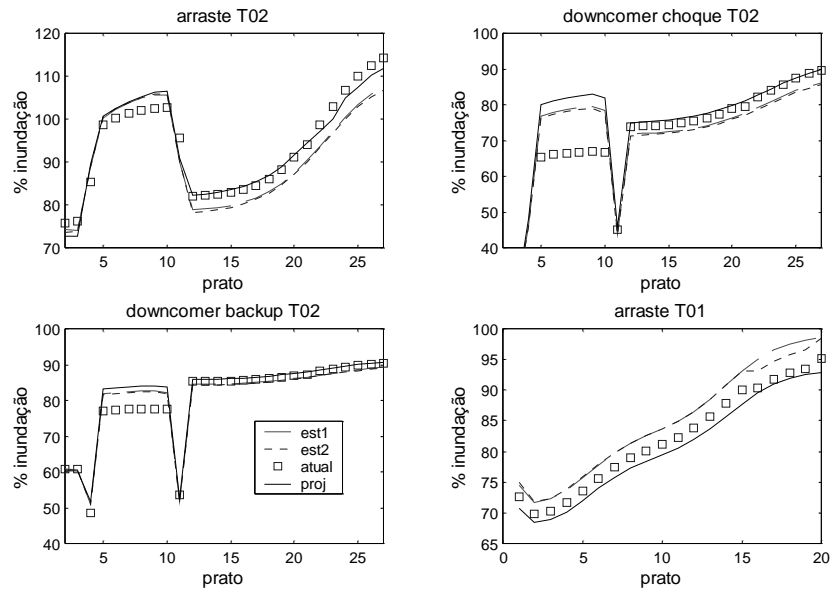


Figura 7.4: Situação hidráulica das colunas T01 e T02 após a subida de carga para 200 ton/h. (a) coluna T02, inundação por arraste; (b) coluna T02, inundação no downcomer por choque, segundo o critério de Koch; (c) coluna T02, inundação no downcomer por backup; (d) coluna T01, inundação por arraste.

Por outro lado, tanto a estrutura 1, como a estrutura 2 parecem aliviar a situação do fundo da coluna T02, principalmente no que se relaciona ao arraste. Também se constata que estas soluções propostas levam a uma maior utilização da coluna T01. Estas estruturas parecem atuar no sentido de distribuir melhor a carga entre as duas colunas, atacando o grande problema da unidade.

Com o objetivo de se avaliar como seria a transição entre a carga de 190 ton/h e a carga de 200 ton/h, acompanhou-se a situação hidráulica de dois pratos considerados críticos, o prato 10 e o prato 27 veja a figura 7.5. Estes pratos apresentam elevadas percentagens de inundação e se encontram em duas regiões distintas da coluna. Isto foi feito para garantir que não estariam ocorrendo *overshoots* demasiados na unidade, durante o transiente da subida de carga, que poderiam levar a coluna T02 à inundação durante este transiente.

Observando-se os resultados obtidos na figura 7.5 verifica-se a ocorrência de *overshoots*, porém o pico da percentagem de inundação não ultrapassa em 1% o seu valor final, tanto para o prato 10, como para o prato 27. As simplificações realizadas em termos de inventário, já citadas na seção 5.1.3, não parecem ter potencial para alterar significativamente este *overshoot*.

A consideração de que os vasos de flash têm volume nulo, ou seja respondem instantaneamente às perturbações, são conservativas, pois a consideração do volume atuará no sentido de atenuar os picos de temperaturas e efeitos correspondentes. Por outro lado, a desconsideração dos volumes dos trocadores de calor não é conservativa, e distúrbios nas temperaturas controladas das correntes de saída de alguns trocadores podem durar um período de tempo mais prolongado na planta real do que na simulação. Na soma, os dois efeitos

previstos pela consideração dos inventários dos vasos de flash e dos trocadores de calor atuarão de formas opostas, acabando por se atenuarem.

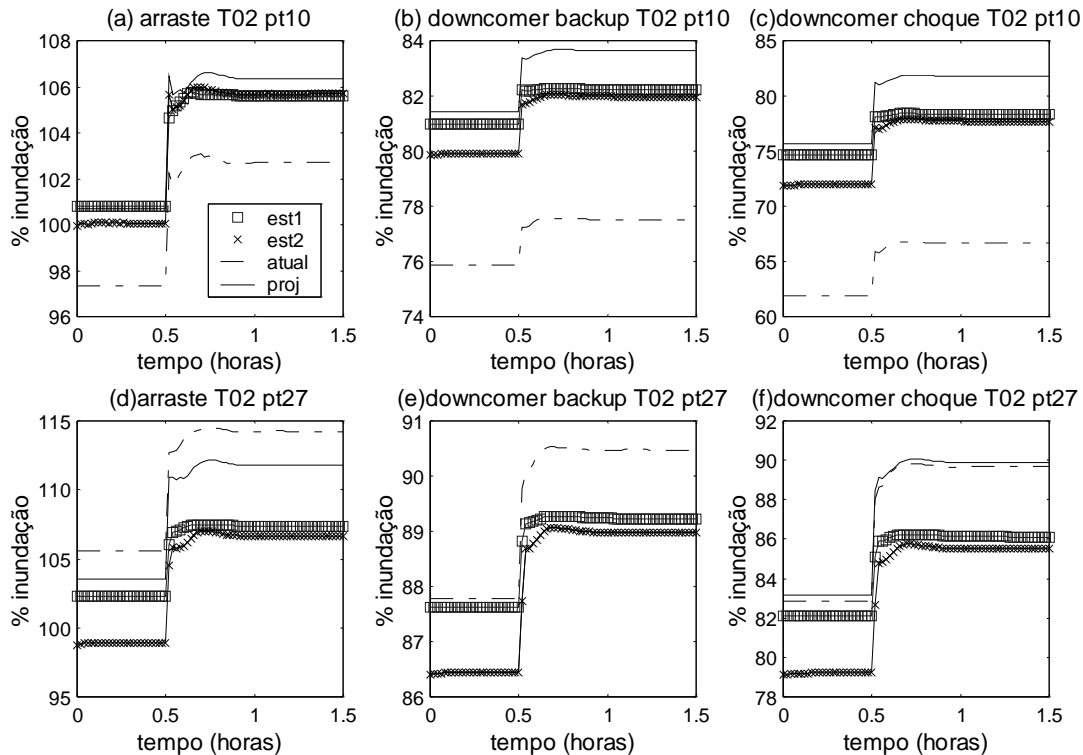


Figura 7.5: Análise da situação hidráulica dos pratos 10 e 27, relativa aos quatro casos de operação, durante o transiente de subida de carga da unidade.

A capacidade de produção e as perdas da unidade para a carga de 200 ton/h também foram avaliadas com respeito aos quatro casos de operação simulados, conforme mostram as tabelas 7.1 e 7.2.

Como pode ser observado na tabela 7.1, as maiores produções do corte C2+ foram obtidas nos casos de projeto e da estrutura 1 (149 ton/h). Porém analisando-se melhor o caso de projeto, a coluna T02 está mais sobrecarregada que os outros casos, resultando numa maior subutilização da coluna T01. Conforme observado em dados de planta, a vazão de fundo da coluna T02 na situação crítica quando ela quase inundou é de cerca de 66 ton/h, veja a figura 7.1 (e), isto indica que provavelmente a unidade não conseguiria chegar à situação simulada no caso de projeto, forçando uma diminuição na carga de processamento, ou ainda numa perda maior de eteno, do que a simulada. O resultado do caso atual de operação leva a conclusões semelhantes, embora numa condição um pouco melhor do que o caso de projeto, a coluna T02 foi poupada, e a coluna T01 foi melhor utilizada, porém às custas de uma menor produção do corte C2+. Porém a coluna T01 parece ainda estar subutilizada, enquanto que a vazão de fundo da coluna T02 é de cerca de 67,5 ton/h, superior ainda a vazão limite que se verificou operacionalmente.

Tabela 7.1: Vazões das correntes que deixam a unidade, para as quatro situações simuladas.

Correntes		Atual	est1	est2	projeto
fundo T01 (1° corte C2+)	ton/h	80,8	82,8	83,6	79,5
fundo T02 (2° corte C2+)	ton/h	67,6	66,3	65,0	69,5
corte C2+ total	ton/h	148,4	149,1	148,6	149,0
topo T03 (perda)	ton/h	22,7	22,1	22,1	22,7
topo T04 (perda)	ton/h	21,6	21,6	22,2	21,4
perda total	ton/h	44,3	43,7	44,4	44,1
reciclo metano-eteno	ton/h	8,43	8,29	8,14	8,00

Quanto ao desempenho das soluções propostas, a estrutura 1 apresentou uma elevada produção total de eteno, a qual resultou da utilização da coluna T02 no seu limite e do bom aproveitamento da coluna T01. Já a estrutura 2 indica uma menor vazão de fundo da coluna T02 entre os quatro casos estudados (65 ton/h) e a maior utilização da coluna T01, o que provavelmente possibilitará que a carga da unidade seja ainda elevada, propiciando uma maior produção do corte C2+ total, de maneira que esta estrutura de controle venha a se sobressair em relação as demais. A próxima tabela faz uma análise do eteno contido nas correntes.

Tabela 7.2: Eteno contido nas correntes que deixam a planta, para os quatro casos simulados.

Correntes		Atual	est1	est2	projeto
fundo T01 (1° corte C2+)	ton/h	31,7	32,9	33,6	30,7
fundo T02 (2° corte C2+)	ton/h	51,6	51,1	50,0	53,2
corte C2+ total	ton/h	83,3	84,0	83,5	83,9
topo T03 (perda)	ton/h	0,18	0,22	0,17	0,19
topo T04 (perda)	ton/h	0,16	0,16	0,17	0,16
perda total	ton/h	0,34	0,38	0,34	0,35
Reciclo metano-eteno	ton/h	5,53	4,76	5,33	4,90

Observe que, de um modo geral, as considerações feitas para a tabela 7.1 também são válidas para a tabela 7.2. A única constatação importante é que a perda de eteno da estrutura 1 é a maior entre os quatro casos, embora a vazão total desta corrente seja a menor, por causa da elevada perda de eteno no topo da coluna T03 desta estrutura. Isto é compensado pelo fato de que o reciclo metano-eteno da estrutura 1 contém menos eteno que os demais casos, o que acaba por fazer com que esta estrutura apresente a maior quantidade de eteno no corte C2+.

Em última análise, as estruturas 1 e 2 apresentaram bons desempenhos, fazendo com que a unidade venha a operar com um melhor aproveitamento das capacidades hidráulicas tanto da coluna T01, como da coluna T02, o que deve possibilitar um aumento da carga de processamento da unidade, com um proporcional incremento na produção do corte C2+. A estrutura 2 apresenta uma maior facilidade de implementação, sem que seja necessária uma parada da unidade, ao contrário da implementação da estrutura 1. A estrutura 2 ainda tem

outra vantagem em relação a estrutura 1, que é o fato de propiciar uma melhor utilização da coluna T01, aliviando mais a coluna T02, possibilitando que se opere a unidade com uma maior carga de produção. A próxima seção será dedicada ao aprimoramento desta alternativa.

7.3 Aprimoramento da Estrutura 2

A estrutura 2 demonstrou ter um bom potencial, porém apresenta ainda alguns pontos que podem ser melhorados. Em primeiro lugar, vale lembrar que a sua filosofia era a de manter constante a relação entre as alimentações das colunas T01 e T02, de modo que uma elevação na carga da unidade não viesse a sobrecarregar a coluna T02 e subutilizar a coluna T01, como acontece com a estrutura atual da planta.

7.3.1 Papel desempenhado pelo desvio 1

A grande questão desta alternativa reside na definição de qual é a relação correta entre as cargas das colunas, como saber se a utilização do desvio 1 não está sendo excessiva, ou insuficiente. O projeto original da unidade previa que a coluna T01 operasse com uma carga mais pesada que a coluna T02, produzindo diferentes cortes C2+. Esta diferença foi levada em conta no projeto da desetanizadora, que é a coluna posterior, que recebe os dois cortes C2+, produzidos nesta unidade. Mas a questão ainda persiste, como definir qual a relação ideal de carga entre as duas colunas. Optou-se então por outra linha de raciocínio, para definir a vazão de carga do desvio 1. Analisou-se o seu impacto na produção da unidade e na recuperação total de eteno. A tabela 7.3 mostra dados de correntes com a abertura do desvio 1.

Tabela 7.3: Vazão do desvio 1 e seu reflexo no corte C2+ e no reciclo metano-eteno.

Desvio1	1° corte C2+	2° corte C2+	produção total corte C2+	reciclo metano-eteno	soma corte C2+ e reciclo
ton/h	ton/h	ton/h	ton/h	ton/h	ton/h
0,0	80,5	68,5	148,9	8,0	157,0
1,1	81,5	67,4	148,8	8,1	156,9
2,3	82,4	66,3	148,7	8,1	156,8
3,4	83,4	65,2	148,6	8,1	156,7
4,5	84,4	64,1	148,5	8,2	156,7
5,6	85,3	63,0	148,4	8,2	156,6
6,7	86,3	62,0	148,3	8,3	156,6
7,8	87,2	60,9	148,2	8,3	156,5
8,9	88,2	59,9	148,1	8,4	156,5
10,0	89,1	58,9	148,0	8,4	156,4
11,1	90,1	57,9	147,9	8,5	156,4

A figura 7.6 ilustra melhor o comportamento da unidade, através da representação gráfica dos dados contidos na tabela 7.1. Como se pode perceber, a utilização do desvio 1 provoca um aumento na produção de fundo da coluna T01 e uma diminuição na corrente de fundo da coluna T02. Observe na tabela 7.3, que, quando não há utilização do desvio 1 (0 ton/h), o 1° corte C2+ tem uma vazão de 80,5 ton/h, e o 2° corte C2+ tem uma vazão de 68,5 ton/h. Quando a vazão do desvio 1 é de 10 ton/h, os cortes C2+ passam a ter vazões de 89,1 ton/h e 58,9 ton/h respectivamente. Isto é, o aumento de 10 ton/h na vazão do desvio 1

provocou um aumento de 8,6 ton/h no 1° corte C2+ e uma diminuição de 9,6 ton/h na vazão do 2° corte C2+. A produção total do corte C2+ diminuiu em 1 ton/h, porém as perdas não aumentaram no mesmo valor, porque parte da diferença foi recuperada na corrente de reciclo metano-eteno, que teve sua vazão aumentada em 0,6 ton/h.

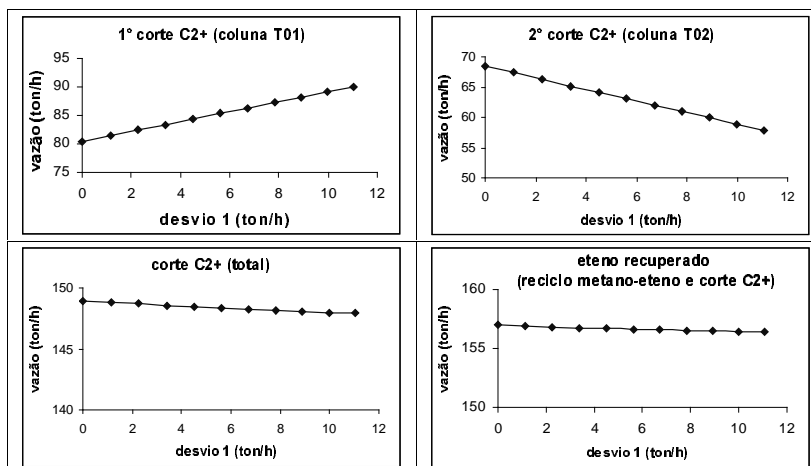


Figura 7.6: Impacto da vazão do desvio 1 na variação das vazões do corte C2+ e na soma do corte C2+ total com o reciclo metano-eteno.

À primeira vista, pode parecer que a utilização do desvio 1 não seria aconselhável. Vale lembrar porém, que a diminuição da produção do corte C2+ em 1 ton/h, possibilitou uma diminuição de 9,6 ton/h na vazão de fundo da coluna T02, que vem a ser o gargalo da unidade, permitindo um aumento na sua carga de processamento e, por consequência, na produção da planta.

Ao que parece, a melhor estratégia, baseada nas condições hidráulicas da unidade, seria utilizar sempre a coluna T02 no seu limite, transferindo a carga em excesso para a coluna T01, através do desvio 1. A carga de processamento da unidade seria elevada até o momento em que a coluna T01 começasse a acusar problemas de inundação. Assim seriam exploradas ao máximo as capacidades das duas colunas desmetanizadoras, que passariam a operar simultaneamente no seu limite.

Para esgotar a questão do desvio 1, seria interessante se definir o porquê da abertura do desvio 1 implica no leve aumento das perdas da unidade. A figura 7.7 ajuda a esclarecer esta questão.

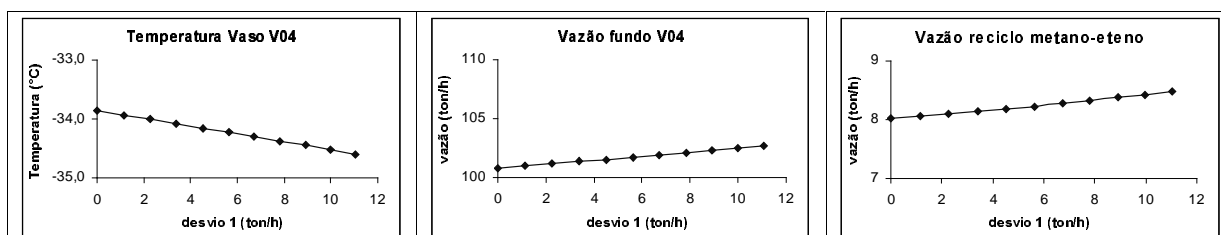


Figura 7.7: Condições do vaso V04 e do reciclo metano-eteno com a utilização do desvio 1.

Como pode ser observado, a utilização do desvio 1 provoca uma diminuição na temperatura do vaso V04, que passa a condensar uma maior fração da carga da unidade. Isto ocorre porque uma maior utilização do desvio 1 provoca uma menor vazão do produto de fundo da coluna T02. Com isto, o calor injetado no refeedor HX02 tem que ser menor. Para que isto ocorra, o trocador HX05 resfriará mais o ramal principal da carga da unidade, que é o fluido de aquecimento refeedor HX02. Como a carga da unidade foi mais resfriada no trocador HX02, mesmo cedendo menos calor para o refeedor HX02, ela chegará ao vaso V04 numa temperatura inferior a que ela chegaria se a o desvio 1 não fosse usado, fazendo com que este equipamento opere numa temperatura mais baixa.

A corrente do reciclo metano-eteno aumenta com a abertura do desvio 1. A explicação decorre do fato de que o desvio 1 provoca uma diminuição da carga líquida da coluna T02, que seria injetada na seção de topo, passando a ser desviada para a coluna T01. Sendo assim, a coluna T01 tem a sua carga aumentada, o que provoca um aumento no seu destilado vapor de topo, que será injetado na alimentação inferior (prato teórico 11) da coluna T02. Em resumo, o desvio 1 provoca a diminuição da carga líquida da coluna T02 e um aumento na sua carga de vapor, o que acaba por aumentar a corrente de produto de topo desta coluna, que acaba por carregar mais a coluna T04. O aumento da corrente de reciclo metano-eteno, expresso na figura 7.7 é então explicado, pois esta corrente é derivada do produto de fundo da coluna T04. Sumarizando, o uso do desvio 1 faz com que a coluna T04 opere com maior carga, provocando também um aumento na perdas de topo desta coluna, para a corrente de metano AP.

7.3.2 Análise de diferentes configurações para a estrutura 2

Após o melhor entendimento dos efeitos do desvio 1, pode-se retornar a questão original desta seção, que consiste em escolher a melhor forma para se definir a relação ideal entre as cargas das colunas T01 e T02. Continuando na linha da abordagem que leva em conta as restrições hidráulicas da coluna T02, o histórico indica que os problemas de inundação estão relacionados com a região inferior da coluna. A avaliação hidráulica desta região, mostrada na figura 7.4, indica que os pratos de fundo são os mais críticos. Sendo assim, provavelmente pode-se estabelecer uma vazão máxima do produto de fundo desta coluna, a partir da qual ela inunda, acredita-se que esta vazão seja de cerca de 66 ton/h, com base do observado na figura 7.1 (e). Outro fator que deve ser levado em conta é o fato recém analisado, que indica que a abertura do desvio 1 implica num pequeno aumento na perda da unidade. Então a melhor alternativa de controle deve utilizar a coluna T02 no seu limite, minimizando as perdas da unidade, desviando o excesso de carga para a coluna T01, evitando os problemas hidráulicos da unidade.

Atuando diretamente em R

Uma estratégia interessante seria manipular a relação entre as cargas das colunas, de modo a controlar a vazão de fundo da coluna T02, mantendo-a no seu limite, a carga em excesso desta coluna, é então redirecionada para a coluna T01, através do desvio 1. Então o controle da vazão de fundo da coluna T02 envia o set-point para o controlador da relação entre as cargas das colunas T01, como ilustra a figura 7.10 (a). O set-point da vazão de fundo

da coluna T02 será fixado em 65 ton/h, para dar uma certa segurança e para que se compare este resultado com o observado na figura 7.5, quando a relação entre as cargas foi mantida constante. A figura 7.8 mostra a evolução dinâmica das inundações nos pratos 10 e 27, para os casos quando a relação entre as duas cargas da unidade é mantida constante (R constante) e o caso no qual a relação é variada pelas vazões das alimentações (R varia). A figura 7.9 mostra o valor que a relação R assumiu frente à subida de carga, ao longo da simulação.

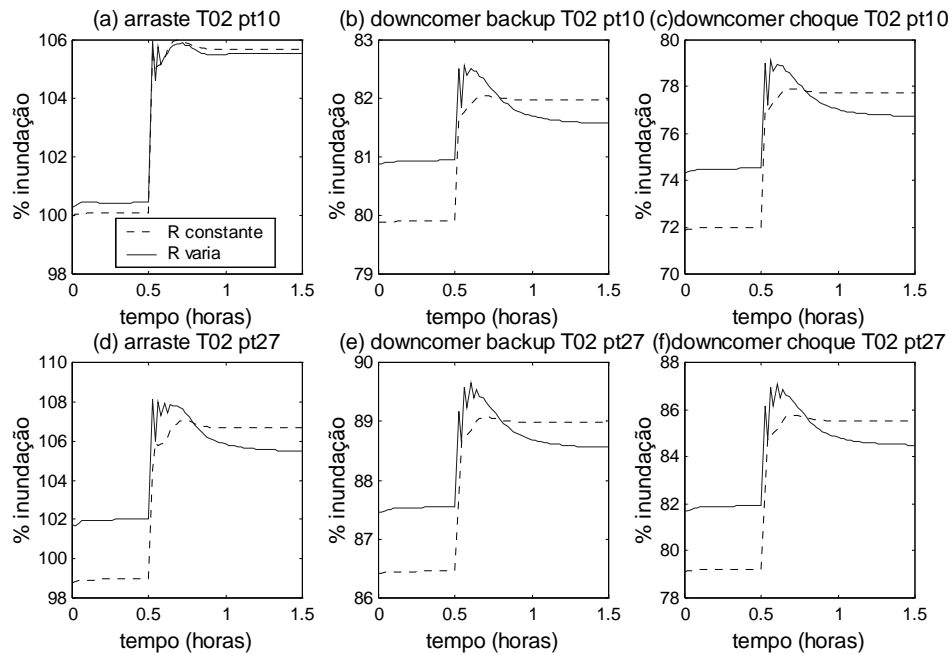


Figura 7.8: Comportamento dinâmico da inundação nos pratos 10 e 27 para o caso no qual a relação entre as duas cargas da unidade é mantida constante (R constante), e para o caso no qual a relação é variada pela vazão de fundo da coluna T02 (R varia).

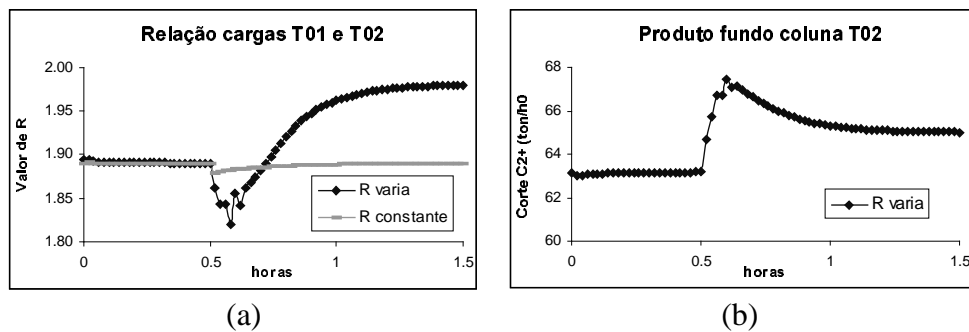


Figura 7.9: (a) Valor da relação R entre as cargas da coluna T01 e T02 frente à subida de carga, conforme a estratégia de controle utilizada. R constante: relação entre as cargas é mantida constante, R varia: R corrigido pela vazão de fundo da coluna T02. (b) Vazão do fundo da coluna T02 para o caso no qual R varia.

Como se pode perceber na figura 7.8, a situação final dos pratos é um pouco melhor no caso em que o R varia, porém o transiente apresenta um *overshoot* bastante pronunciado. A percentagem máxima de inundação por arraste no prato 27 é de 108% durante o transiente, sendo 3% superior ao valor final, o que pode levar a coluna à inundação. O problema é que a

ação de controle só é tomada quando a vazão de fundo da coluna T02 começa a perceber o efeito da subida de carga, neste momento toda a coluna já está excessivamente carregada, e a abertura do desvio 1 pode ser demasiadamente tarde para impedir a inundação. Na figura 7.9 pode-se constatar que quando a carga da unidade estava baixa, a vazão do produto de fundo da coluna T02 estava em 63 ton/h, abaixo do set-point de 65 ton/h, neste momento o desvio 1 estava fechado. Com o aumento da carga da unidade, num primeiro momento ocorreu uma maior carga da coluna T02, o R diminui, até que a vazão de fundo da coluna atingisse o set-point, a partir deste momento começou a abertura do desvio 1 (R começa a aumentar). Porém a vazão do 2º corte C2+ chega até 67 ton/h antes de começar a diminuir novamente para estabilizar no valor setado, podendo inundar a coluna. O aumento do valor de R caracteriza uma maior carga para a coluna T01 e uma diminuição na carga para a coluna T02.

Estratégia final de controle utilizando uma malha interna

Com vista a tornar mais rápida a ação de controle, verificou-se que a carga que influencia diretamente a vazão de fundo da coluna T02 é a proveniente do fundo do vaso V05, alimentada no prato 4, que vem a ser a alimentação principal da coluna. Então uma alternativa interessante seria manter sob controle esta vazão, através da manipulação da vazão do desvio 1. Um controlador em cascata manteria a vazão de fundo da coluna T02 em 65 ton/h, enviando o set-point que define a vazão da carga principal de alimentação da coluna, como mostra a figura 7.10 (b). Nesta modificação pelo fato de se controlar diretamente a vazão da carga principal, pode-se definir no controlador uma vazão máxima para corrente, que está vinculada com a vazão máxima da corrente de fundo da coluna T02, sem que esta coluna inunde. Isto propiciou um fator a mais de segurança para a estrutura proposta.

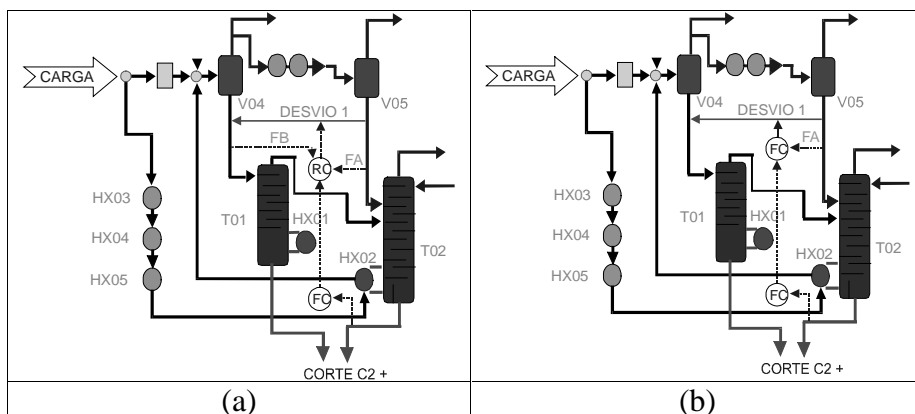


Figura 7.10: Representação da estrutura de controle proposta 2 modificada. (a) Na primeira modificação, o set-point para a relação R é enviado pelo controlador da vazão de fundo da coluna. (b) Na segunda modificação, o desvio 1 é usado para controlar diretamente a vazão da alimentação principal da coluna T02, e o set-point desta malha vem do controlador da vazão do produto de fundo desta coluna.

A figura 7.11 ilustra como as dinâmicas dos pratos 10 e 27 respondem a esta nova configuração na qual a estrutura controla a carga da coluna T02. Pode-se perceber que a alternativa deu bons resultados, pois o *overshoot* foi bem atenuado em relação ao caso no qual R varia expresso na figura 7.8. Quanto à comparação entre a estrutura com R constante e a que controla a carga da unidade, esta última parece ser bem superior, pois embora presente

um pico inicial significativo no caso do arraste do prato 27, a estrutura com R constante atinge um valor de inundação superior, ao longo do transiente, estabilizando num patamar superior. A figura 7.12 mostra como se comportaram as vazões controladas.

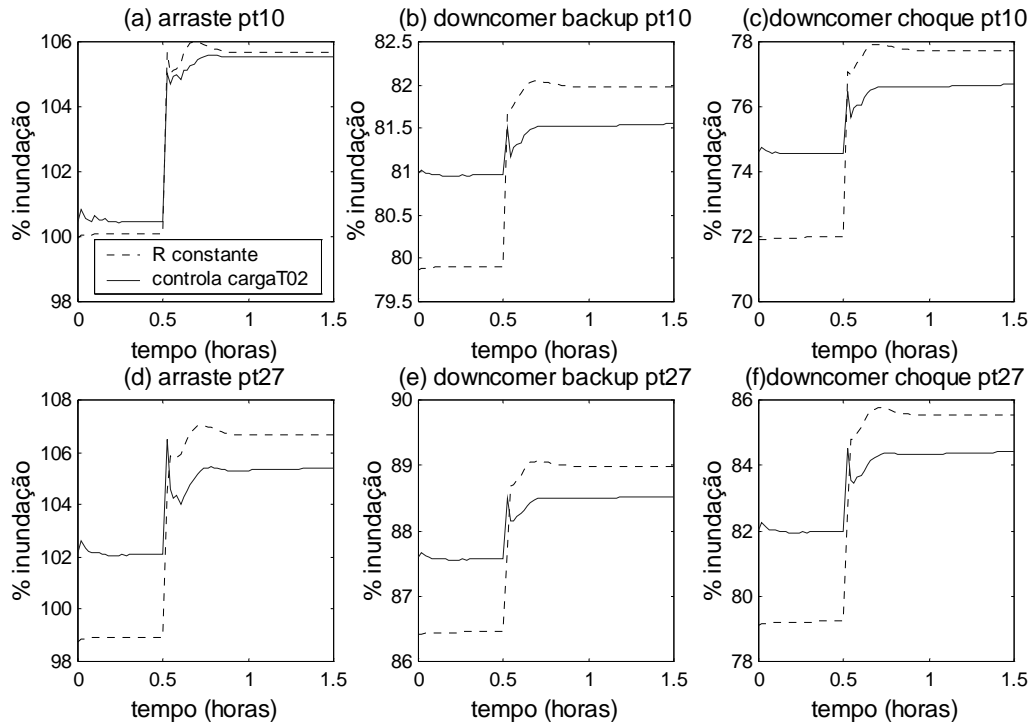


Figura 7.11: Comportamento dinâmico da inundação nos pratos 10 e 27 da coluna T02, para os casos no qual a relação entre as duas cargas da unidade é mantida constante (R constante) e o caso no qual o desvio 1 controla a vazão da carga principal, com o set-point sendo enviado pela vazão do 2º corte C2+ (controla carga T02).

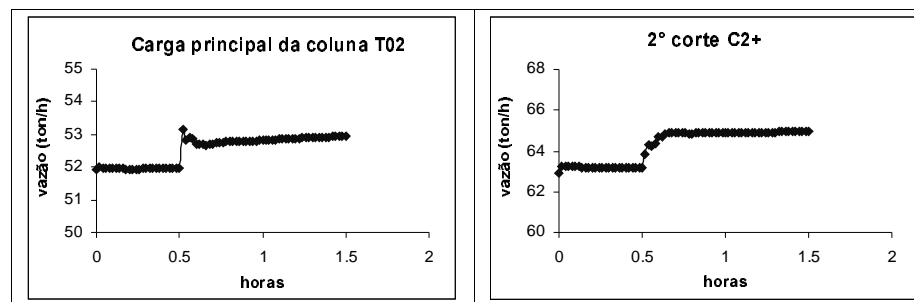


Figura 7.12: Comportamento das variáveis controladas da estrutura modificada, no caso em que a carga principal da coluna T02 é controlada, frente a uma subida de carga da unidade. Plotou-se a vazão da carga principal e a vazão do produto de fundo da coluna T02 (2º corte C2+).

Como pode-se constatar, com base na figura 7.12, logo após a subida de carga da unidade (0,5 horas), a carga principal da coluna T02 sobe bruscamente, até atingir o seu máximo (53,3 ton/h), permanecendo próxima deste valor, de modo que a vazão de fundo da coluna T02 sobe suavemente, sem a ocorrência de *overshoot*, até a vazão de 65 ton/h, que corresponde ao valor do set-point.

Observando-se a figura 7.11, na comparação da primeira configuração da estrutura 2, que mantinha o R constante, a última alteração proposta acaba utilizando mais a coluna T02 antes da subida de carga e mantendo-a numa situação hidráulica menos crítica, após a subida de carga, sem apresentar *overshoots* que possam inundar a coluna. Esta parece ser a melhor configuração, seguindo a filosofia da estrutura 2, que propõe a utilização do desvio 1 para transferir para a coluna T01 a carga em excesso da coluna T02. A próxima seção discutirá os ganhos potenciais desta estrutura.

7.3.3 Potencial de ganho da estrutura 2

Para se ter uma idéia do potencial de ganho da estrutura 2 em relação a situação atual, pode-se considerar que a vazão do produto de fundo da coluna T02 seja mantida no seu valor máximo sem que haja inundação, que neste caso foi considerado como sendo de 65 ton/h. A tabela 7.4 apresenta o resultado desta análise.

Tabela 7.4: Situação comparativa da unidade desmetanizadora operando na situação *atual* e na *estrutura 2*, mantendo-se a vazão do 2º corte C2+ igual.

		<i>estrutura 2</i>	<i>atual</i>
carga da unidade	Ton/h	200,0	195,0
1º corte C2+	Ton/h	83,6	79,5
2º corte C2+	Ton/h	65,0	65,2
corte C2+ total	Ton/h	148,6	144,7
perda topo T03	Ton/h	22,1	21,9
perda topo T04	Ton/h	22,2	21,3
perda total	Ton/h	44,4	43,1
reciclo metano-eteno	Ton/h	7,0	7,2
recuperação	%	96,7	96,6

Para que a situação hidráulica da região inferior da coluna T02 seja equivalente nas duas estruturas, é necessário que a carga da unidade na situação *atual* seja 5 ton/h inferior do que a carga da unidade operando com a *estrutura 2*. Isto reflete na diminuição na vazão do corte C2+ de cerca de 4 ton/h, o que corresponde a cerca de 2 ton/h de eteno, o produto mais valorizado da central petroquímica. A recuperação da unidade, que neste caso é calculada como a percentagem do corte C2+ que está contido na carga da unidade que será incorporado aos produtos de fundo das colunas T01 e T02, também é um pouco superior no caso da *estrutura 2*.

A figura 7.13 mostra a situação da coluna T02 em relação a inundação por arraste, que é o mais crítico, nas duas condições operacionais que foram ilustradas na tabela 7.4. Observe que a região inferior da coluna apresenta situações hidráulicas equivalentes. A maior diferença é encontrada na região superior, quando a condição *atual* tem um melhor desempenho, mas como o histórico do problema aponta que a inundação ocorre na região inferior da coluna, esta diferença no topo não é considerada relevante. Caso venham a ser constatados problemas nesta região, uma nova solução deverá ser estudada, devendo até ser considerado o uso do desvio 2, que, conforme discutido na seção 3.3.2, diminui a vazão de

líquido na região superior da coluna, diminuindo a percentagem de inundação causada por arraste no topo.

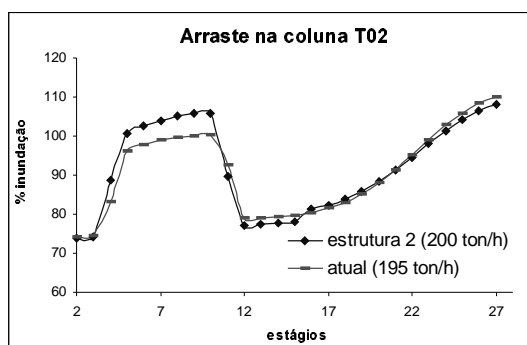


Figura 7.13: Percentagem de inundação por arraste, conforme a correlação empírica de Fair, para a estrutura de controle *atual* e para a *estrutura 2* proposta, quando a vazão de fundo da coluna T02 é igual a 65 ton/h, nos dois casos.

7.3.4 Desempenho da estrutura 2 em relação a distúrbios na composição da carga da unidade

Para se avaliar o desempenho da *estrutura 2* frente a distúrbios na composição da carga, foi simulada a condição da coluna T02 em três situações de carga, expressa na tabela 7.5:

Tabela 7.5: Composição da carga para os três casos avaliados.

		carga leve	carga normal	carga pesada
hidrogênio	fração molar	0,16	0,17	0,17
metano	fração molar	0,35	0,30	0,25
eteno	fração molar	0,31	0,35	0,39
etano	fração molar	0,07	0,07	0,07
propeno	fração molar	0,08	0,08	0,09
buteno	fração molar	0,03	0,03	0,03

A grande alteração entre os três casos diz respeito ao teor de metano e eteno contido na carga da unidade. A figura 7.14 traz a situação hidráulica da coluna T02, quando a unidade opera com uma carga de processamento de 200 ton/h e com a *estrutura 2*.

Analisando os resultados da figura 7.14, pode-se perceber que a situação de carga normal e carga leve apresentam o mesmo perfil hidráulico. Pode-se concluir também que estas duas situações são mais conservativas em relação à situação de carga pesada. Assim sendo, a estrutura de controle 2, com a modificação que utiliza o controle da carga principal da coluna T02, apresenta um bom desempenho, mesmo frente à distúrbios na composição da carga.

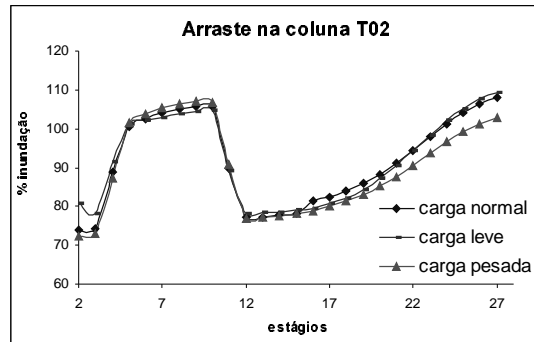


Figura 7.14: Comparação entre o perfil das porcentagens de inundação da coluna T02, para os três casos de composição de carga da unidade mostrados na tabela 7.5, com uma mesma carga de processamento (200 ton/h).

Então a *estrutura 2* tem no controle da vazão de fundo da coluna T02 um bom mecanismo para se levar em conta a situação hidráulica desta coluna. A filosofia desta estratégia não utiliza o desvio 2 e utiliza o desvio 1 ao mínimo, apenas desviando a carga que estaria em excesso na coluna T02. A estratégia de se utilizar o desvio 1 ao mínimo se deve ao estudado na seção 7.3, que mostra que este desvio alivia a situação da coluna T02 às custas da elevação das perdas da unidade.

Capítulo 8

Conclusões e sugestões

O grande objetivo que norteou esta dissertação de mestrado foi a busca de uma melhor compreensão da unidade desmetanizadora, para atacar de forma efetiva a sua problemática. Vários fundamentos da engenharia química foram empregados ao longo desta análise.

Uma das primeiras etapas do trabalho consistiu na obtenção de uma simulação estacionária da planta que reproduzisse satisfatoriamente os dados de planta e, em especial, o perfil de temperatura da coluna T02, que apresentava um patamar intermediário. Foram utilizados dois simuladores comerciais, que foram o Aspen Plus e o Hysys Process. Os dois simuladores apresentaram resultados similares, porém o Hysys Process se mostrou um pouco mais amigável, enquanto que o Aspen Plus apresentou as melhores ferramentas numéricas e de análises de resultados.

No desenvolvimento do modelo estacionário desta unidade, constatou-se a importância do ajuste do parâmetro binário entre o par metano-eteno, verificou-se que os valores contidos na biblioteca Aspen Plus e do Hysys Process produziam diferenças significativas no perfil de temperatura da coluna T02. Optou-se por utilizar um valor intermediário entre eles, que produziu um resultado satisfatório para este caso. Para estudos futuros é sugerida uma melhor modelagem termodinâmica que envolveria o ajuste de diferentes valores do par kij metano-eteno para as diferentes regiões do processo, seguindo um procedimento semelhante ao sugerido em (Gros et al., 1997).

A simulação dinâmica foi desenvolvida no Aspen Dynamics devido a este simulador possuir um melhor método de integração (Euler implícito de passo variável é o padrão), que aumenta a estabilidade e a velocidade da simulação. O comportamento dinâmico da planta é reproduzido satisfatoriamente, principalmente no que se refere a distribuição de carga entre as colunas T01 e T02, que vem a ser o principal problema da unidade. A simulação dinâmica pode ainda ser aprimorada, com a introdução dos volumes dos vasos de separação e dos trocadores de calor, que não alterariam a natureza dos comportamentos dinâmicos observados, mas confeririam uma maior precisão às amplitudes dos *overshoots*, das respostas inversas e aos tempos relativos aos transientes da unidade.

Com relação a problemática da unidade, foi constatado que, quando a unidade opera com uma carga elevada, a atual estratégia de controle está sobrecarregando a coluna T02, que passa a apresentar problemas hidráulicos, e subutilizando a coluna T01. Com isto a carga da unidade é limitada a um valor abaixo do desejado. Para melhorar a situação hidráulica da coluna T02, foram implantados os desvios 1 e 2, que permitiram a elevação da carga da unidade, porém às custas de um aumento nas perdas da unidade.

Foram apresentadas então duas estruturas de controle melhor descritas na seção 3.4.2, a *estrutura 1* propõe uma mudança de alinhamentos que permite o controle da temperatura do vaso V04, responsável pela carga da coluna T01. A *estrutura 2* propõe que o desvio 1 seja utilizado para transferir para a coluna T01, a carga em excesso que está sendo enviada para a coluna T02. Em ambas as estruturas o desvio 2 não seria utilizado, pois ele diminui a eficiência de separação da unidade, conforme discutido em 3.4.2.

A *estrutura 2* apresenta a vantagem de poder ser implementada sem a parada da unidade, em face disto ela foi aprimorada. A proposta final (seção 7.3.2) estabelece o controle da carga principal da coluna T02 pela manipulação da vazão desviada para a coluna T01 (desvio 1), o set-point desta malha de controle seria enviado pelo controlador da vazão de fundo da coluna T02 que seria definida no máximo valor que ela poderia assumir, para que não ocorressem problemas de inundação. Esta estrutura é capaz de impedir a inundação da região inferior da coluna T02, onde historicamente nesta unidade iniciam-se os problemas. Caso venham a serem constatados problemas no topo desta coluna, o uso do desvio 2 pode ser reconsiderado, visto que ele tem a capacidade de aliviar esta região (seção 3.3.2).

O resultado final deste estudo é a proposta de uma solução acabada, que pode ser implementada imediatamente, sem a parada da unidade, de modo simples e com custos reduzidos. Prevê-se um aumento de carga da ordem de 5 ton/h (seção 7.3.1), o que elevará a produção do corte C2+ em cerca de 4 ton/h, que corresponde a cerca de 2 ton/h do principal produto da planta petroquímica, o eteno.

Referências bibliográficas

AspenTech, Aspen Technology, Inc., (1999), consultar <http://www.aspentech.com>

Gros, H.P., Urlic, L.E. e Brignole, E.A., (1997), “Phase Equilibrium Dominant Parameter Matrix of Multicomponent Distillation Trains”, Computers chem. Engng, vol. 21, Suppl., S733-S738

Harrison, M.E. e France, J.J., (1989), “Trouble Shooting Distillation Columns, Part 1: Technique and tools”, Chemical Engineering, vol. 96, nº 3, 116-123

Harrison, M.E. e France, J.J., (1989), “Trouble Shooting Distillation Columns, Part 3: Trayed columns”, Chemical Engineering, vol. 96, nº 5, 126-133

Hyprotech Ltd., (1999), consultar <http://www.hyprotech.com>

Kessler, D.P. e Wankat, P.W., (1988), “Correlations for Column Parameters”, Chemical Engineering, vol. 95, nº 13, 71-74

Kister, H.Z. e Haas, J. R., (1990), “Predict Entrainment Flooding on Sieve and Valve Trays”, Chemical Engineering Progress, vol. 86, nº 9, 63-69

Kister, H.Z., (1992), “Distillation Design”, McGraw-Hill, USA

Lockett, M.J., (1986), “Distillation tray fundamentals”, Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain

Lygeros, A.I. e Magoulas, (1986), “Column flooding and entrainment”, Hydrocarbon Processing, dezembro, 43-44

Mathworks Inc, The, (1998). “Control System Toolbox for use with MATLAB”, Natick/MA/EUA.

Perry, R.H. e Chilton C.H., (1986), “Manual de Engenharia Química”, 5ª edição, Guanabara Dois, Brasil, seção 18

Seader, J.D. e Hemley, E.J., (1998), “Separation Process Principles”, John Wiley & Sons Inc., USA

Urlic, L., Bottini, S., Brignole, E.A. e Romagnoli, J.A., (1991), Thermodynamic tuning in separation process simulation and design”, Computers chem. Engng, vol. 15, nº 7, 471-479

Xu, S.X., Winfield, C., Bownman, J.D., (1998), “Distillation – How to push a tower to its maximum capacity”, Chemical Engineering, vol. 105, nº 8, 101-105

Yanagi, T., (1990), “Inside a Trayed Distillation Column”, Chemical Engineering, vol. 97, nº 11, 120-129