



AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DE UMA UNIDADE DESMETANIZADORA

Leandro P. Lusa¹, Jorge O. Trierweiler^{2*} Argimiro R. Secchi³
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Rua Marechal Floriano, 501 / 81, CEP. 90020-061 - Porto Alegre - RS, BRAZIL
e-mail: {keco¹, jorge², arge³}@enq.ufrgs.br

Resumo: Este trabalho estuda uma unidade desmetanizadora real que apresenta problemas de instabilidade operacional, caracterizados pela inundação de uma de suas colunas de fracionamento, limitando a sua carga de processamento. A primeira etapa do estudo consistiu no entendimento da unidade e de sua problemática, quando constatou-se que a estrutura de controle atual da unidade estaria prejudicando o seu desempenho hidráulico. Foram então sugeridas duas estruturas de controle alternativas, de fácil implementação, buscando aumentar a capacidade de produção da planta. Foram realizadas simulações estacionárias e dinâmicas da planta operando segundo quatro condições distintas: condição de projeto, situação atual e nas duas soluções propostas. Os dados resultantes destas simulações serviram de base para a realização de um estudo comparativo das situações hidráulicas resultantes na planta, definiu-se então qual alternativa seria a melhor solução para o caso.

Palavras-chave: Unidade desmetanizadora, Hidráulica, Inundação, Simulação dinâmica.

1 UNIDADE DESMETANIZADORA

A unidade desmetanizadora tem por objetivo separar uma corrente de gás comprimido seco em correntes de metano, hidrogênio e outras duas correntes, constituídas por um corte de eteno e mais pesados (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.

Para executar esta tarefa, a planta, que opera em dois níveis de pressão (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. A Fig. 1 ilustra a unidade para facilitar o entendimento.

1.1 Descrição da unidade

A carga da unidade é dividida em três ramais, que são resfriados antes de chegarem ao vaso de separação V04. O ramal principal, que contém cerca de 80% da carga, é resfriado primeiramente nos trocadores HX03, HX04 e HX05. Por fim este ramal cede calor ao refervedor da segunda coluna desmetanizadora (T02). A fração condensada da corrente é separada no V04, constituindo a carga da primeira coluna desmetanizadora T01. O vapor de topo deste vaso é resfriado, sendo a fração condensada coletada no vaso V05, gerando a carga principal da T02. As correntes de fundo das colunas T01 e T02 constituem os dois cortes de C2+. Esta primeira região da unidade é a responsável pela produção e especificação dos dois cortes de C2+.

* A quem toda a correspondência deve ser submetida

A segunda região da unidade visa produzir as correntes de metano e hidrogênio, recuperando parte do eteno contido nas correntes de vapor do vaso V05 e da coluna T02. Para isso ela possui mais duas colunas de fracionamento, que são a absorvedora de etileno (T03) e a recuperadora de metano (T04).

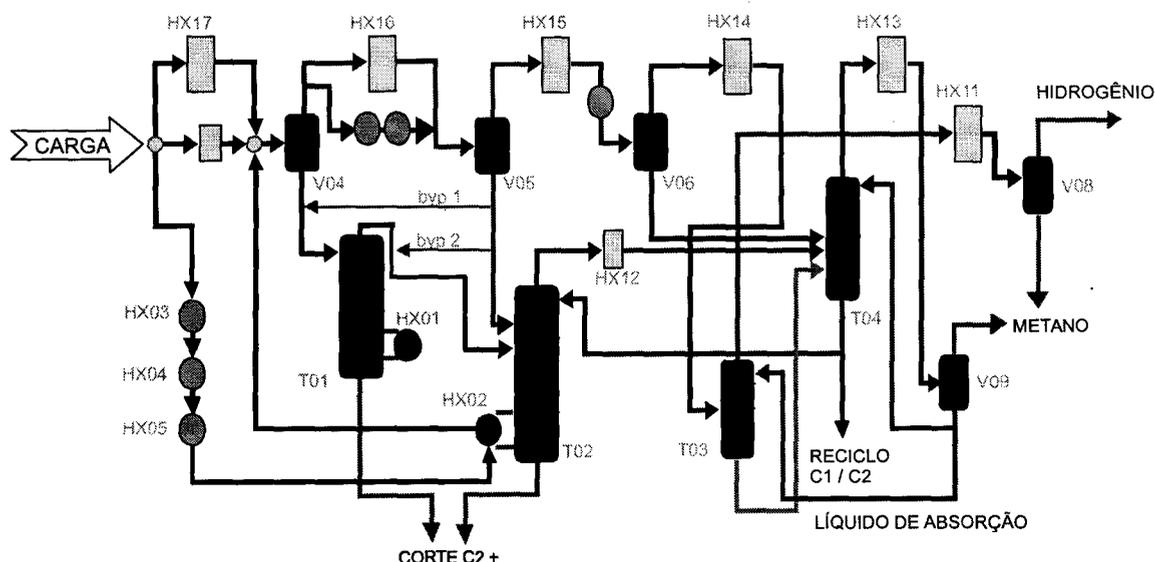


Figura 1: representação simplificada da unidade desmetanizadora.

1.2 Problemática da unidade

Dois fatores caracterizam a operação insatisfatória da planta:

Inundação da T02: A coluna desmetanizadora secundária (T02) apresenta problemas de inundação quando a carga da unidade é elevada.

Perda de eteno: A recuperação de eteno está abaixo do valor desejado. O resultado do balanço de massa aponta para uma recuperação de 97,6%, embora a consolidação dos dados ainda não tenha sido realizada, este valor indica que a eficiência da unidade está abaixo da desejada.

A origem deste problema foi discutida detalhadamente em [Lusa *et al.*, 1999], mas em termos gerais, pode-se explicar o que ocorre por uma simulação mental, acompanhando a Fig. 1. Elevando a carga da unidade, a vazão do ramal principal sobe, e o calor cedido para o refeedor da T02, por consequência aumenta, provocando uma maior evaporação nesta coluna. A temperatura da carga que chega no vaso V04 também se eleva, reduzindo a fração condensada neste vaso, diminuindo a carga da T01. Contudo o vapor que deixa o topo do vaso V04 é resfriado de maneira eficiente nos HX08, HX09 e HX17, mantendo a temperatura do vaso V05 no mesmo patamar anterior à elevação de carga. Isto faz com que a fração da carga que deveria ter sido condensada no vaso anterior (V04), venha a ser condensada neste vaso (V05), aumentando de maneira desproporcional a carga da coluna T02.

Desta forma se observa que o acréscimo da carga da unidade foi distribuída de maneira não uniforme entre as duas colunas, subutilizando a coluna T01 e sobrecarregando a coluna T02, que já teve o seu fluxo interno de vapor elevado, devido ao aumento de carga térmica no seu refeedor (EA02). Este refluxo interno excessivo acaba por causar a inundação desta coluna.

1.3 Implantação de desvios

Com o objetivo de aumentar a produção da unidade, foram implantados dois desvios, que estão sendo usados atualmente, representados na Fig. 1. O desvio 1 (byp1) possibilita o redirecionamento de parte da carga da T02 para a T01, aumentando o corte C2+ produzido na primeira coluna desmetanizadora, e desafogando a segunda coluna.

O desvio 2 (byp2) desvia parte da carga da T02, que seria injetada próxima ao topo, para uma seção mais central da coluna, com o objetivo de melhorar a sua condição hidráulica, porém diminuindo a eficiência de separação da unidade. Em termos gerais pode se dizer que graças a implantação dos desvios, a situação atual da planta pode processar uma carga mais elevada, porém as custas de uma menor recuperação de etileno.

1.4 Estrutura de controle atual

A estrutura de controle atualmente usada na planta não é capaz de fazer uma boa utilização das colunas T01 e T02. Como já mencionado, o ramal principal da carga é resfriado pelos trocadores HX03 e HX04, que possuem uma carga térmica quase constante. Já o trocador HX 05 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 pelo teor de metano no corte C2+ produzido nesta coluna.

Quando a unidade sofre uma elevação de carga, inicialmente ocorre uma maior vaporização no HX02, fazendo com que a temperatura controlada da coluna T02 assuma um valor superior ao seu set-point. A ação de controle então faz com que o HX05 retire mais calor da carga da unidade, diminuindo a injeção de calor no refeedor HX02, até que o set-point seja novamente atingido. Num segundo momento, com a chegada de uma maior carga na coluna T02, faz-se necessária uma maior injeção de calor no seu refeedor, para manter o produto de fundo especificado. Sendo assim, o resfriamento no HX05 é novamente reduzido, fazendo com que a carga chegue mais aquecida no HX02. Porém, isto faz com que a temperatura do vaso V04 estabilize num patamar mais elevado, conforme já mencionado anteriormente, e segundo o que pode ser visto através de dados da simulação dinâmica da unidade (fig. 2).

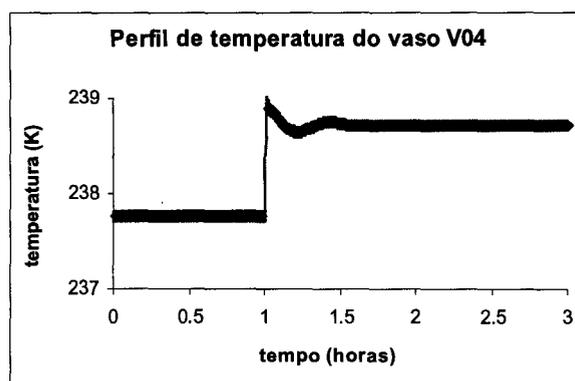


Figura 2: simulação dinâmica da unidade durante subida de carga.

Verifica-se que o calor trocado no HX05 tem importância vital na especificação do fundo da 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, para que se possa

controlar de maneira independente o teor de metano no fundo da T02 e a temperatura do vaso V04.

2 ESTRUTURAS DE CONTROLE PROPOSTAS

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. Discussões mais profundas sobre a problemática da unidade e a formulação das estruturas propostas podem ser encontradas em [Lusa et al., 2000] e em [Lusa, 2000].

2.1 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 refeedor, aumentando ou diminuindo o calor injetado neste equipamento (fig. 3 (a)).

2.2 Estrutura 2 – sem alteração de alinhamento

Esta estrutura sugere o uso do desvio 1 (byp1) para manipular a distribuição de carga entre as colunas DA01 e DA02, retornando a carga em excesso que sobrecarregaria a segunda coluna. A especificação do produto de fundo da coluna T02 continuaria sendo controlada pela carga térmica do HX05. A Fig. 3 (b) ilustra melhor esta opção.

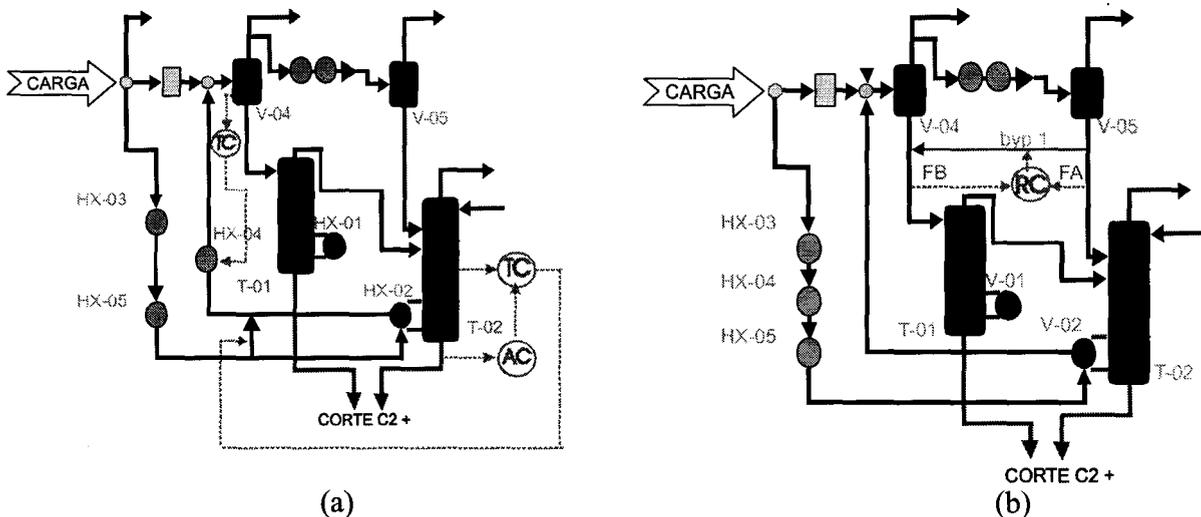


Figura 3. representação esquemática da estrutura 1 (a) e da estrutura 2 (b).

A escolha da estrutura de controle mais adequada envolve a análise do seu efeito na hidráulica da unidade, visando um melhor aproveitamento da capacidade hidráulica das duas colunas desmetanizadoras, de modo que se possa aumentar a capacidade de processamento da planta.

3 ESTUDO DA HIDRÁULICA

Uma coluna de pratos pode ser caracterizada como um vaso de pressão cilíndrico vertical no qual vapor e líquido fluem em contracorrente, de modo que se promova transferência de massa e

energia entre eles. Nas colunas que utilizam o escoamento do tipo cross-flow, o líquido flui horizontalmente sobre cada prato, transbordando sobre o vertedouro, sendo escoado por gravidade para o prato inferior através do downcomer. O vapor flui para o topo, por diferença de pressão, atravessando as aberturas de cada prato, borbulhando através do líquido que está na bandeja, promovendo o íntimo contato entre as duas fases. Mais detalhes podem ser encontrados em qualquer livro clássico sobre o tema [Seader e Hemley, 1998], junto com representações esquemáticas que ilustram melhor a idéia.

Os pratos da coluna possuem basicamente três áreas, que são a área de borbulhamento, a área de selagem do downcomer, que trás o líquido da bandeja superior, e a área de entrada do downcomer, por onde transbordará o líquido que desce para a bandeja inferior. Quanto ao tipo de aberturas por onde passa o vapor, os pratos podem ser classificados como perfurados, valvulados e com borbulhadores.

3.1 Mecanismos de inundação

O diagrama de desempenho típico dos pratos perfurados está ilustrado na Fig. 4, que mostra como a região de operação estável da coluna está relacionada com a vazão de vapor e de líquido, e quais são os mecanismos que podem limitar esta região conforme discutido por [Yanagi, 1990].

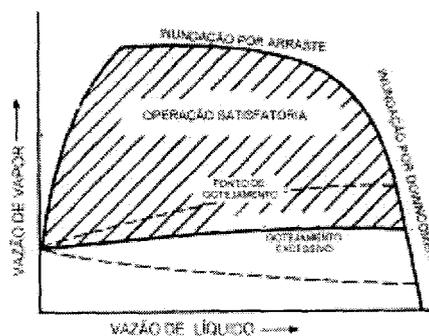


Figura 4: curva característica do desempenho de um prato de destilação.

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

- A. **Arraste excessivo.** Ocorre quando se opera com baixas vazões de líquido e elevadas vazões de vapor. A velocidade excessiva do vapor arrasta o para a bandeja superior, não permitindo que o líquido esco para o fundo da coluna.
- B. **Gotejamento excessivo.** Refere-se a 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, e acaba por diminuir a eficiência da separação.
- C. **Inundação.** A inundação pode ser diferenciada em inundação de downcomer ou inundação por arraste. Em [Kister, 1992] é feita uma ampla discussão sobre o assunto.

Inundação por arraste (jet flooding). Esta inundação ocorre quando temos deficiência de área de borbulhamento do vapor no líquido, fazendo com que a velocidade ascendente do vapor seja muito elevada, provocando o arraste excessivo de líquido. Isto causa um aumento na perda de carga no prato e no reciclo de líquido para o prato superior, fazendo com que o downcomer fique sobrecarregado, acabando por levar à inundação da coluna.

Fair propôs uma correlação (Fig. 5 (a)) que permite calcular a velocidade de inundação do vapor (U_{nf}). Através da relação entre a velocidade superficial do vapor na bandeja (U_s) e a sua velocidade de inundação do vapor (U_{nf}), calcula-se a percentagem de inundação do prato.

Inundação no downcomer (downcomer flooding). Este tipo de inundação ocorre quando a área do downcomer é menor do que deveria ser, e pode ocorrer por dois mecanismos diferentes, que são:

Inundação no downcomer tipo backup. Ocorre quando a altura da 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, inundando a coluna.

A coluna de líquido aerado no downcomer é necessária para escoar o líquido do prato superior para o inferior, vencendo o gradiente de pressão na bandeja. A altura da coluna é função da perda de carga do vapor no prato, do nível de líquido do prato inferior, e da perda de carga devido ao escoamento do líquido aerado no downcomer (h_{da}). A Fig. 5 (b) ilustra melhor esta condição.

Inundação no downcomer tipo choque. Ocorre quando a vazão de líquido excede um certo limite e as perdas por atrito no downcomer tornam-se excessivas, impedindo a passagem do líquido para a seção inferior. Três correlações foram propostas para prever este tipo de inundação: Glitsch, Nutter e Koch. Esta última é a mais conservativa, prevendo velocidades mais baixas do líquido no downcomer, com base no tempo de permanência necessário para do líquido nesta região.

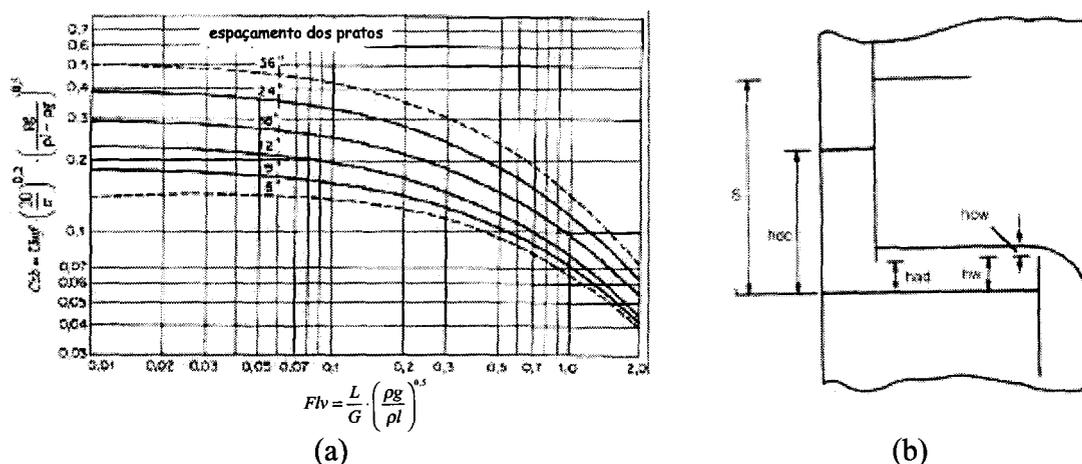


Figura 5. (a) correlação de Fair para o arraste, curvas ajustadas para cada espaçamento entre pratos. (b) parcelas que afetam a altura de líquido aerado no downcomer (h_{dc}).

4 AVALIAÇÃO HIDRÁULICA

O primeiro passo para efetuar a avaliação hidráulica da planta é tentar definir que tipo de inundação que deve estar ocorrendo. Um procedimento sugerido por [Harrison e France, 1989] é o aumento da carga da coluna (T02) até a inundação, com o monitoramento da perda de pressão na coluna (ΔP), e de algum parâmetro capaz de estimar a sua eficiência. Aqui, a eficiência será determinada através da análise do perfil de temperatura da coluna.

A Fig. 6 traz dados da unidade durante uma subida de carga, incluindo um momento no qual a coluna quase inundou (entre 15 e 20 horas). Foram plotados o ΔP , o nível, e o perfil de várias temperaturas da coluna. Pode-se perceber a elevação no ΔP da coluna e oscilações no seu nível, que indicam situação próxima a inundação. Observe que neste momento a diferença de temperatura entre o topo e o fundo da coluna diminuiu, o que pode ser visto na figura como uma diminuição da temperatura de topo e um aumento na temperatura de fundo. Este fato indica a diminuição da eficiência de separação. Esta perda de eficiência seria causada pelo arraste excessivo de líquido, indicando que a inundação deve ser por arraste (jet). Se, em outra situação, a coluna inundasse sem sinais prévios de perda de eficiência, só sendo observada uma elevação

brusca no ΔP , o mecanismo determinante provavelmente estaria ligado ao downcomer [Harrison e France, 1989].

Embora a análise dos dados de planta indicam que a inundação seja por arraste, optou-se por realizar a avaliação hidráulica da coluna T02 para os três mecanismos de inundação, sendo que a correlação utilizada para prever a inundação de downcomer por choque foi a de Koch, por ser a mais conservativa [Kister, 1992].

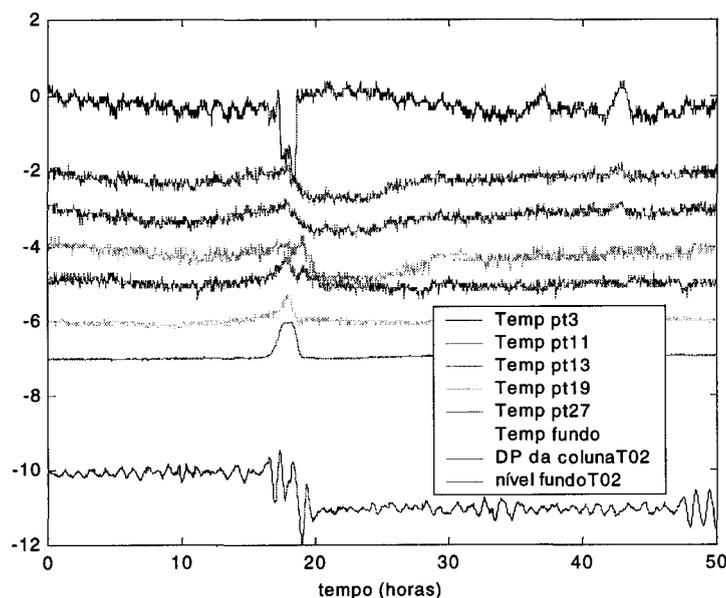


Figura 6: Dados reais da coluna T02 durante a subida de carga e situação de quase inundação. As curvas estão na mesma ordem da legenda, e relacionam-se a deltas em relação a um valor base.

Com o objetivo de analisar melhor o que de fato está ocorrendo na planta, foram realizadas simulações dinâmicas do comportamento da unidade frente a uma subida de carga¹ semelhante a ocorrida quando se coletaram os dados que deram origem a Fig. 6. Sendo assim foram estudadas quatro situações operacionais diversas:

1. Projeto: planta sem os desvios com a configuração original de projeto.
2. Atual: planta operando com os desvios byp1 e byp2.
3. Estrutura 1: planta com a estrutura de controle 1 (mudança de alinhamento).
4. Estrutura 2: planta com a estrutura de controle 2 (uso do byp1).
- 5.

As Fig. 7 (a), (b) e (c) mostram a condição final da coluna T02 para cada uma destas situações. Também se avaliou como a hidráulica da coluna T01 seria afetada quanto a inundação tipo arraste (fig. 7 d), que é a mais crítica naquele caso.

Analisando-se os resultados das correlações para inundação da coluna T02, pode-se constatar que a inundação causada por arraste parece ser a mais crítica, inclusive configurando uma situação com inundação em algumas regiões. As seções da coluna que mais preocupam são a superior (do prato 5 ao 10) e o fundo (a partir do prato 23). Deve-se salientar que a correlação de Fair é conservativa, sendo que, dependendo do caso, o valor estimado por ela se distancia entre 10 e 20% do ponto de inundação real da coluna, conforme comparação de resultados de predição com situações reais, apresentados em [Seader e Hemley, 1998]. Resultados de varredura de gama que teriam sido feitos nesta coluna indicariam que a inundação começaria no fundo. Se este for o

¹ Todas as situações operacionais foram simuladas com a mesma subida de carga, ou seja, a carga foi aumentada bruscamente de 190 ton/h para 200 ton/h. Utilizou-se o simulador *Aspen Dynamics* no presente estudo.

caso, a inundação tipo downcomer parece também preocupar nas regiões inferiores da coluna (a partir do prato 25).

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, não se ater tanto aos valores da percentagem de inundação em si, mas considerar a relação entre elas, nas propostas variadas, verificando se a tendência é de melhora ou de piora.

Analisando a situação da coluna T02, não são observados grandes diferenças entre a situação de projeto e a situação atual, não sendo possível explicar 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 byp1 e byp2) 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 pela diminuição da recuperação de eteno na planta real, situação que não foi representada na simulação dinâmica.

Por outro lado, tanto a estrutura 1, como a estrutura 2 parecem aliviar a situação do fundo da coluna T02, principalmente no que é relacionado 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, que é o problema original da unidade.

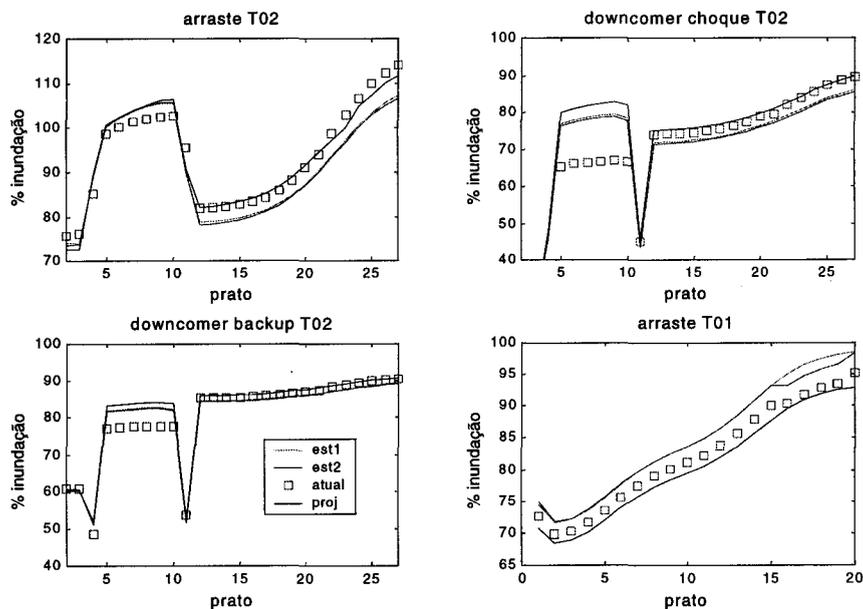


Figura 7: Situação hidráulica das colunas: (a) coluna T02, inundação por arraste, (b) coluna T02, inundação no downcomer tipo choque, (c) coluna T02, inundação no downcomer tipo backup, (d) coluna T01, inundação por arraste.

Com o objetivo de se avaliar como seriam os transientes relativos à subida de carga, foi realizado o estudo dinâmico da situação de dois pratos representativos da coluna. Foram escolhidos os pratos 10 e 27, por serem os mais críticos em duas regiões distintas da coluna T02.

Procurou-se averiguar se as estruturas de controle propostas não estariam passando por uma situação na qual a coluna T02 pudesse inundar, durante a ação de controle, visto que a Fig. 2 já mostra que *overshoots* são situações comuns nesta unidade.

Observando-se os resultados obtidos na Fig. 8 fica claro que não existem perigos quanto a ocorrência de *overshoots* prejudiciais no transiente. Constata-se que mesmo no fundo da coluna (prato 27), onde a integração energética acentua os efeitos da dinâmica do sistema, o maior valor da percentagem de inundação não ultrapassa em 1% o valor estabilizado no estacionário final.

Baseados nos resultados apresentados nessa seção, pode-se esperar que as estruturas propostas 1 e 2 melhorarão a situação hidráulica da coluna T02, permitindo que a carga da unidade seja aumentada. Com relação a condição atual da planta, acredita-se que a recuperação de projeto de 99,5% não possa ser atingida sem que se comprometa seriamente a hidráulica da coluna. Dados de planta dão sustentação a essa afirmação, uma vez que a recuperação atual de eteno encontra-se em torno de 97,6%.

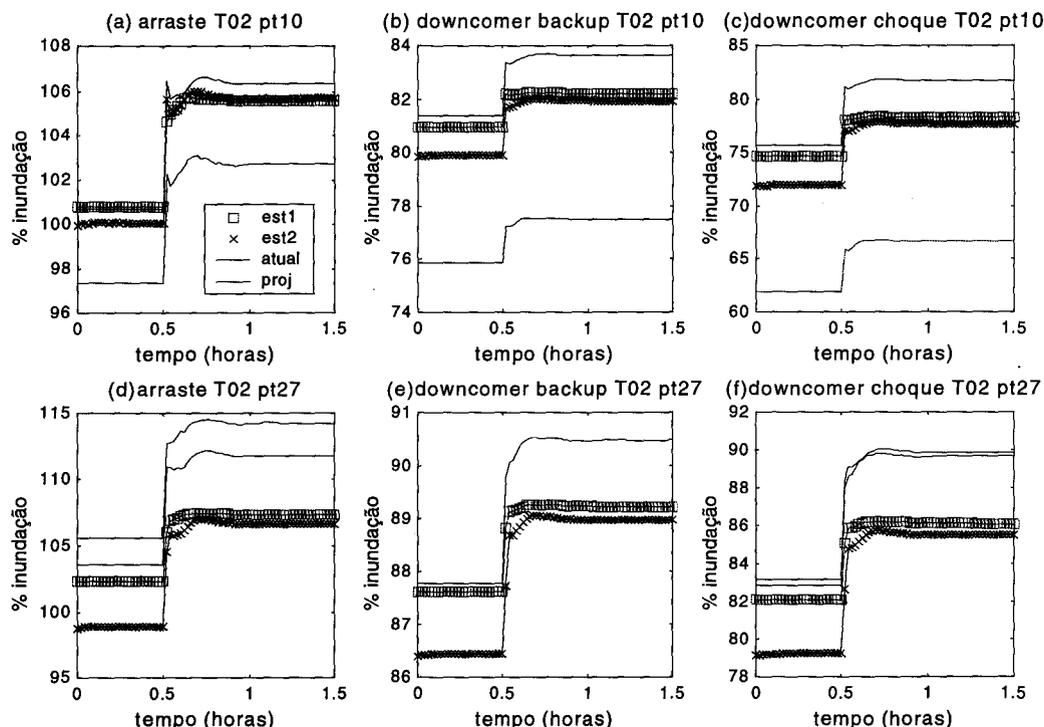


Figura 8: avaliação do comportamento dinâmico da hidráulica dos pratos mais críticos da coluna T02, durante a subida de carga, conforme as quatro situações operacionais.

5 CONCLUSÕES

A unidade desmetalizadora estudada apresenta uma característica intrínseca relacionada com a má distribuição de carga, que sobrecarrega a segunda coluna desmetalizadora (T02), deixando subutilizada a primeira coluna (T01). Conforme o apurado através da análise de dados de planta, e de resultados de simulação, a estrutura de controle atualmente utilizada na planta é responsável por boa parte deste problema. Isto foi brevemente discutido na primeira seção do artigo, sendo aprofundado na referência citada.

Para lidar com esta problemática, foram sugeridas duas estruturas de controle que atacam diretamente o problema, procurando inserir um grau de liberdade que permita controlar de modo independente a distribuição do corte C2 + entre as duas colunas T01 e T02, e a especificação do fundo da coluna T02. Foram então testados os desempenhos das duas estruturas, e comparativamente da situação da planta de projeto, e da sua condição atual.

Conforme observações preliminares de dados de planta analisados no artigo, acredita-se que a inundação seja causada por arraste. Após uma breve discussão sobre hidráulicas de colunas, foram utilizadas as correlações empíricas sugeridas em literatura para caracterizar qual seria o problema. Ficou evidenciado que a inundação por arraste é a que obtém maiores índices de inundação, embora a percentagem relativa a inundação por downcomer também atinja valores elevados. As estruturas 1 e 2 demonstraram terem capacidade de aliviarem a situação da coluna crítica, além de utilizarem melhor a capacidade da coluna T01. Os estudos dinâmicos também

mostraram a não ocorrência de situações críticas durante o transiente, que pudesse inviabilizar o uso das soluções apontadas.

Acredita-se que a implementação de uma das duas alternativas, além de não envolverem um elevado custo inicial, poderão fazer com que a planta opere com uma carga superior a atual, com a recuperação requerida no projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Simone M. Marcon pelo auxílio no estudo e na implementação das correlações empíricas utilizadas no cálculo das inundações.

REFERÊNCIAS

- Harrison, M.E. e France, J.J. (1989), "Trouble Shooting Distillation Columns, Part 3: Trayed columns", Chemical Engineering, vol 96, n° 5, 126-133.
- Kister, H.Z. (1992), "Distillation Design", 1° ed., McGraw-Hill, USA.
- Lusa, P.L. (2000), "Desenvolvimento de Estratégias de Controle para uma Unidade Desmetanizadora", dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, (veja: <http://www.enq.ufrgs.br/labs/lacip/>)
- Lusa, P.L., Trierweiler, J.O., Sechi, A.R. (1999), "Dynamic Behavior of a Demethanizer Unit", II Congresso de Engenharia de Processos do Mercosul", Florianópolis, SC, Brasil.
- Lusa, P.L., Trierweiler, J.O., Sechi, A.R. (2000), "Increasing the Production Rate and Ethylene Recovery of a Heat Integrated Demethanizer Unit", anais do ADCHEM 2000, Pisa, Itália.
- Seader, J.D. e Henley, E.J. (1998), "Separation Process Principles", 1° ed., John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Yanagi, T. (1990), "Inside a Trayed Distillation Column", Chemical Engineering, vol 97, n° 11, 120-129.