

**vcCopyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP**

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

---

## **CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO PILOTO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO PARA A APLICAÇÃO DE CONTROLE DISTRIBUÍDO**

Cintia Marangoni<sup>1</sup>, Fernanda Regina. Steinmacher<sup>2</sup>, Ricardo Antonio Francisco Machado<sup>3</sup>,  
Ariovaldo Bolzan<sup>4</sup>

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia  
Química e Engenharia de Alimentos. Campus Universitário. Caixa Postal 476 – Trindade,  
Florianópolis – SC. 88010-970

<sup>1</sup> [sissi@enq.ufsc.br](mailto:sissi@enq.ufsc.br), <sup>2</sup> [fersteinmacher@gmail.com](mailto:fersteinmacher@gmail.com), <sup>3</sup> [machado@enq.ufsc.br](mailto:machado@enq.ufsc.br),  
<sup>4</sup> [abolzan@enq.ufsc.br](mailto:abolzan@enq.ufsc.br)

**Resumo** – A situação atual das refinarias brasileiras demanda melhorias na operação da separação de derivados de petróleo. Esta mudança pode ser efetuada através de um sistema de controle adequado à dinâmica da destilação e que garanta a qualidade desejada dos produtos. Uma unidade experimental de destilação foi construída e instrumentada em fieldbus permitindo o estudo de inúmeras técnicas de controle. A dinâmica desta unidade esta sendo avaliada através da caracterização do seu comportamento frente a perturbações características de indústrias petroquímicas. O estudo demonstra a similaridade com colunas de destilação industriais, através de características como a dinâmica lenta. Estas características incentivam a proposta abordada de utilização de um controle distribuído, visando a minimização de transientes provocados pela centralização do controle em unidades de processamento de petróleo.

**Palavras-Chave:** controle distribuído; destilação; dinâmica.

**Abstract** – The Brazilian refineries current situation needs attention and improvements on the separation of petroleum products operation. This change could be obtained through a control system, which attend the specified product quality and also adjusted to the distillation dynamics. An apparatus was constructed and instrumented with fieldbus protocol allowing several control studies. Its dynamics has been evaluated by the response when usual loads, which occur in petrochemical industries, are applied. The study has shown similarity with industrial towers, meanly because the unity has slow dynamic behavior. Characteristics like this stimulated the proposal to use a distributed control to reduce the start up time on crude oil processing because of the central control.

**Keywords:** distributed control, distillation, dynamic.

## 1. Introdução

A destilação é o principal processo envolvido no refino de petróleo. Uma das etapas de transformação do petróleo em produtos comercializáveis é a separação de suas frações (gasolina, querosene, óleo diesel entre outros) realizada através do refino do óleo cru. Portanto, é essencial que estas unidades operem em um ponto de máxima lucratividade, que muitas vezes depende do sistema de controle utilizado. Além disso, a necessidade de ampliação e modernização que se observa atualmente nas refinarias de petróleo e o processamento de óleos pesados, característicos da exploração brasileira, definiram que os investimentos na área de refino sejam direcionados, entre outros, para a adaptação tecnológica das unidades de destilação.

O controle de colunas de destilação é um problema essencialmente multivariável e com inúmeras restrições de operação. O comportamento dinâmico é extremamente não linear e existe um elevado grau de acoplamento entre as variáveis. Em alguns casos, tais condições limitam o uso de técnicas de controle convencionais, do tipo PID (Luyben, 1990; Marlin, 1995; Stephanopoulos, 1984). Estas características, associadas à centralização do sistema de controle na base e no topo da coluna impõem alguns transientes, difíceis de serem minimizados durante a operação da unidade quando perturbada. Um controle centralizado pode se tornar lento diante de algumas situações como a mudança na origem do petróleo processado e a introdução de um controle distribuído através da ação em pontos intermediários da coluna pode ser uma alternativa para minimizar este problema. Segundo Jacobsen & Stogeskad (1994), a maioria dos sistemas de controle estudados utilizam um processo de destilação como caso estudo para a implementação de técnicas avançadas, mas não se preocupam com a proposta de um sistema de controle adequado à dinâmica da unidade.

Sabe-se que inúmeros sistemas de controle, com algoritmos aprimorados e técnicas avançadas são implementadas nas indústrias petroquímicas. Em geral, estes sistemas apresentam bom desempenho, porém demandam um volume grande de trabalho para implementação e uma certa limitação quanto ao número de variáveis utilizadas no controle e a forma de comunicação entre estas. Estes tendem a se tornar complexos, com um grande número de variáveis, ações e intertravamentos. Neste sentido, uma unidade experimental instrumentada em fieldbus torna-se um atrativo devido a descentralização da informação e a maior facilidade de desenvolvimento, operação e administração, confiabilidade do sistema como um todo (o mal funcionamento de uma parte não implica, necessariamente, no mal funcionamento de todo o sistema), manutenção simplificada, entre outros (Rezabek, 2001).

Dessa maneira, buscando a formação e o aperfeiçoamento de engenheiros direcionados à indústria de petróleo e gás natural, desenvolveu-se uma unidade experimental piloto de destilação com um completo sistema de controle. Esta foi projetada para a realização de ensaios experimentais visando o estudo e a implementação de técnicas de controle de processos em refinarias de petróleo. O objetivo deste trabalho consiste em avaliar a dinâmica desta unidade, em especial perante a perturbação na composição da carga – situação similar à de refinarias. Também, a partir desta avaliação propor a implementação do controle distribuído para minimizar os transientes impostos por este tipo de perturbação.

## 2. Unidade Experimental

A unidade piloto de destilação foi projetada e construída para permitir o estudo, demonstração, aplicação e a operação de diversas malhas de controle utilizando os mesmos equipamentos e ferramentas de configuração em software, desenvolvidos para aplicação industrial.

### 2.1. Equipamentos

Para o projeto da unidade experimental foram utilizados os procedimentos descritos na literatura (Gomide, 1988; Henley e Seader, 1981; Rademaker *et al.* 1975) com o auxílio de simulações realizadas no software Hysys®. A unidade representa um processo de destilação a pratos em escala piloto e foi construída em módulos, permitindo o máximo de flexibilidade quanto as variáveis de operação e misturas a serem destiladas. Cada módulo representa um estágio de equilíbrio e atualmente trabalha-se com 13 pratos perfurados. A unidade opera em regime contínuo, uma característica difícil de ser reproduzida em laboratórios de pesquisa. Uma ilustração do prato da coluna pode ser visualizada na Figura 1. Cada módulo possui um orifício para medição de temperatura e um para a coleta de amostra. Além disso, visando o estudo do controle distribuído, foi inserida uma resistência elétrica em cada prato. Dois trocadores de calor a placas são utilizados na unidade piloto: um como refeedor, juntamente com a base da coluna, e outro na corrente de alimentação, para garantir a temperatura da mesma. O condensador utiliza água como fluido refrigerante, proveniente de uma torre de refrigeração.



Figura 1. Vista superior do módulo com detalhamento do prato sem e com resistência elétrica.

Cabe ressaltar que o objetivo desta unidade não consiste no estudo fluidodinâmico e de eficiência de separação deste processo, e sim na dinâmica e controle de colunas de destilação. A Figura 2 apresenta uma fotografia geral da planta de destilação.



Figura 2. Ilustração geral da unidade piloto de destilação.

## 2.2. Instrumentação

A instrumentação da unidade experimental possui 15 instrumentos inteligentes (Smar – Fieldbus Foundation). São estes: seis posicionadores para as válvulas de controle – FY302, dois sensores de nível – LD302 (base e acumulador), três sensores de vazão – LD302 (correntes de alimentação, base e topo), dois sensores de pressão manométrica – LD302 e dois conversores *fieldbus* para corrente – FI302. Ainda, um controlador lógico programável (LC700) possui 43 entradas e saídas digitais e instrumentos analógicos (I/Os). As I/Os são: dezesseis Pt100 (alimentação, base, acumulador e pratos), dois inversores de frequência, cinco sensores do tipo chave de nível e seis variadores de potência e os sinais de liga e desliga das bombas. Dessa maneira, controlam-se as malhas da coluna, o nível dos tanques secundários e processos auxiliares como o armazenamento de produto e a circulação de fluido refrigerante no condensador. A Figura 3 apresenta uma ilustração de duas válvulas, juntamente com os posicionadores em *fieldbus* e um sensor de vazão.

Para a implementação do controle nesta unidade trabalha-se em dois níveis. No nível local (H1) pretende-se aplicar as malhas de controle do balanço de massa (nível da base, do tanque acumulador e vazão de alimentação) e da qualidade do produto (composição dos produtos de base e topo). Todas estas malhas são instrumentadas em Fieldbus, acrescidos da indicação da vazão das correntes de base e topo e das pressões nestes mesmos estágios. A Figura 4 apresenta uma ilustração geral do sistema de controle local da coluna de destilação. É importante observar que estas malhas são uma proposta atualmente implementada, porém, existe a possibilidade de se operar com outras malhas de controle bem como de instalar novos instrumentos, com a facilidade oferecida por um sistema *fieldbus*. Além disso, a instrumentação prevê a introdução de malhas de controle de temperaturas do prato para a implementação do controle distribuído.

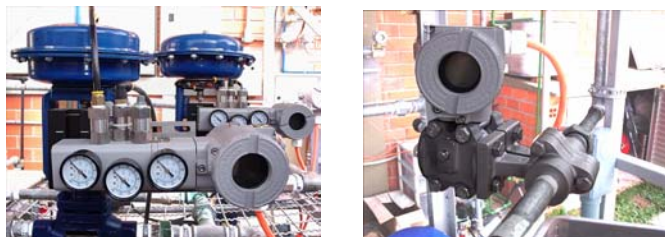


Figura 3. Ilustração de posicionadores *fieldbus* e de sensor de vazão.

No nível H1 da planta pode-se estudar e implementar diversas estratégias clássicas de controle fazendo uso de todas as vantagens da instalação de instrumentação do tipo *fieldbus*. Para o controle multivariável do segundo nível conta-se com diversos softwares que permitem a implementação de técnicas avançadas de controle. Em particular serão analisadas e comparadas estratégias de controle preditivo e linear e não-linear.

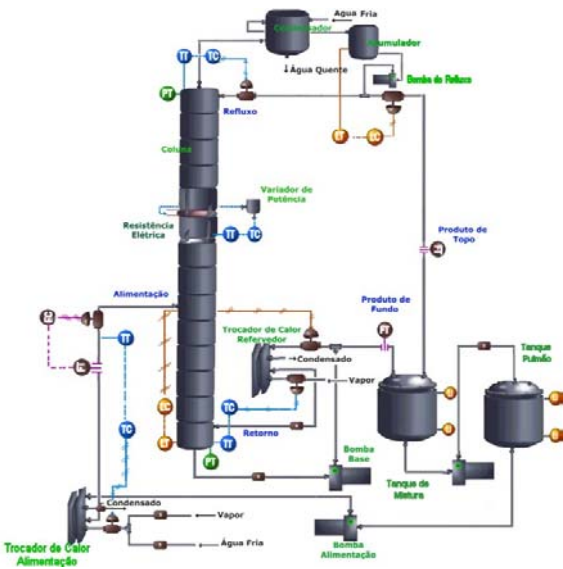


Figura 4. Ilustração geral das malhas de controle.

3. Dinâmica da Coluna de Destilação

Para a análise da dinâmica do processo foram realizados ensaios experimentais com a mistura água-etanol. Cabe ressaltar que esta mistura foi utilizada da facilidade de processamento nos testes iniciais, objetivando-se testes com derivados de petróleo no futuro.

Inúmeras perturbações foram realizadas, objetivando-se estudar o comportamento da coluna, entre elas vazão, temperatura e composição da alimentação. As condições padrão utilizadas nos experimentos são apresentadas na Tabela 1. Durante os ensaios, operou-se com controle apenas nas variáveis que compõe o balanço de massa do sistema, ou seja, controle de nível da base, do acumulador e da vazão de alimentação. As malhas de controle, os parâmetros dos controladores e a observação de todo o processo através das ações que estão sendo tomadas no momento foram acompanhadas através do sistema supervisorio, cuja tela é ilustrada na Figura 5.

Tabela 1 – Condições experimentais utilizadas.

| Variável                             | Valor (SI)             |
|--------------------------------------|------------------------|
| Número de Pratos                     | 13                     |
| Prato da Alimentação                 | 4 (a partir da base)   |
| Vazão de alimentação                 | 0,3 m³.h <sup>-1</sup> |
| Porcentagem de vapor na alimentação  | 0%                     |
| Pressão na base da coluna            | 101KPa                 |
| Pressão no topo da coluna            | 100KPa                 |
| Razão de refluxo (Refluxo/Destilado) | 1,0                    |
| Holdup no prato                      | 0,0016m³               |

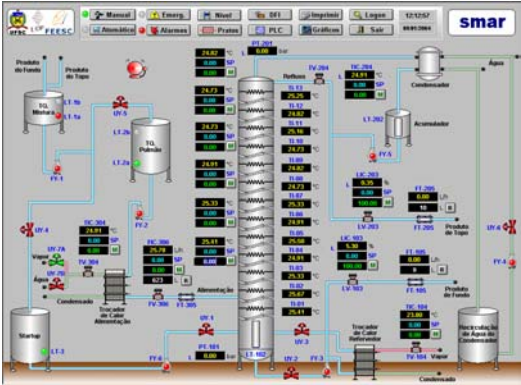


Figura 5. Ilustração geral da planta de destilação observada na supervisão da mesma.

Foram estudados três tipos de perturbações para avaliar a dinâmica do processo: vazão, temperatura e composição da alimentação. Em todos os casos foram aplicados degraus negativos e positivos em magnitudes diferentes. Neste trabalho serão apresentados apenas os resultados referentes à mudança de composição da alimentação. Esta perturbação é similar à ocorrida em refinarias, quando existe a necessidade de processamento de petróleo com origem diferente. Com 5,8h em relação ao início do experimento (quando foi observado o regime permanente da mesma) a composição de alimentação foi reduzida de 35% de etanol para 25%. A Figura 6 apresenta a ilustração da temperatura de alimentação durante o período transiente.

A queda brusca observada na temperatura deve-se não somente ao fato da perturbação na composição, mas também em virtude de que esta perturbação foi realizada com a introdução de material frio. Após um longo período existe uma recuperação da temperatura, atingindo seu estado final, em um valor mais alto que o anterior, conforme esperado. Este mesmo comportamento é observado nos perfis de temperatura da base e do último estágio, apresentados na Figura 7.

Em todos os experimentos realizados, foi possível observar a presença do tempo morto e do acoplamento das variáveis, comportamento este, característico de uma coluna de destilação. Também foram identificados alguns pontos de operação em que não-linearidade do sistema não permite uma operação satisfatória, como valores pequenos de vazões de alimentação, por exemplo.

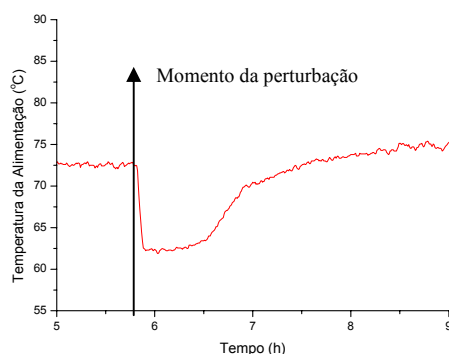


Figura 6. Perfil da temperatura da alimentação durante a perturbação aplicada.

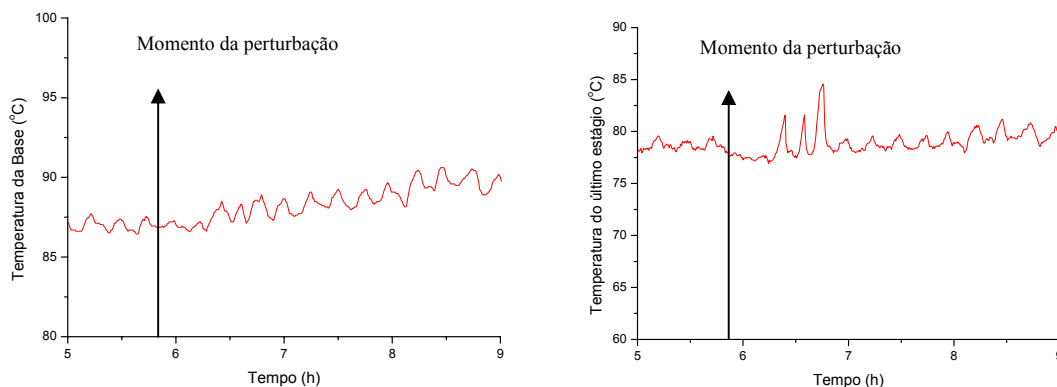


Figura 7. Perfis de temperatura da base e do último estágio durante a perturbação aplicada.

O ponto mais interessante a ser ressaltado consiste na demora para a obtenção do novo estado estacionário, quando a coluna é perturbada. Conforme observado nas figuras, o sistema precisou de cerca de 3 horas para retornar a um regime permanente depois de realizada a perturbação. Estes dados estão de acordo com dados relatados na literatura (Nascimento 1994).

#### 4. Proposta do Aquecimento Distribuído

A partir dos resultados apresentados, pretende-se então implementar um sistema de controle com ação distribuída, aplicado a uma coluna de destilação. A ação distribuída parte da idéia de pontos de aquecimentos distribuídos ao longo da coluna com o objetivo de minimizar o efeito da centralização do controle na base e no topo da coluna. Esta configuração de coluna é aplicada em processos de destilação diabática que objetivam a economia energética da coluna (Agrawal e Herron, 1998). A Figura 8 apresenta a comparação entre uma coluna hipotética sem e com aquecimentos distribuídos.

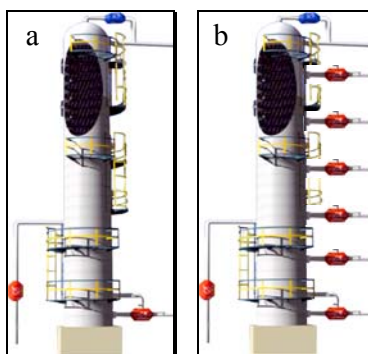


Figura 8. Configuração de uma coluna hipotética (a) típica; (b) com aquecimentos distribuídos.

É importante observar que colunas de destilação são processos com variáveis distribuídas, isto é, processos cujas propriedades mudam com a posição espacial. Portanto, a escolha apropriada do local de instalação do instrumento é fundamental para a eficiência do sistema de controle. Assim, a próxima etapa do trabalho consiste em avaliar quais pontos serão utilizados para a introdução do controle distribuído e como será o comportamento da coluna perante o mesmo.

## 5. Conclusões

A unidade projetada e instrumentada apresenta inúmeras possibilidades de desenvolvimento e pesquisas para a otimização e controle, além do treinamento e formação de recursos humanos para atuar na área de petróleo e gás natural.

Adicionalmente, há flexibilidade de operação com a introdução de calor ao longo da coluna e sua construção modular possibilita o estudo de estratégias para minimização de transientes, que é o principal foco deste trabalho e será objeto de publicações futuras.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-34-ANP/MCT.

## 7. Referências

- AGRAWAL, R.; HERRON, D.M. Intermediate reboiler and condenser arrangement for binary distillation column. *AIChE J.*, v. 44, p.1316-1324, 1998.
- GOMIDE, R. **Operações Unitárias**. Edição do Autor, São Paulo, v. IV, 445p. 1988.
- JACOBSEN, E. W. & SKOGESTAD, S. Instability of distillation columns. *AIChE Journal*. V.40, n.9, 1499-1478, 1994
- HENLEY, E.J. & SEADER, J.D. **Equilibrium-Stage Separation Operation in Chemical Engineering**. John Wiley & Sons, Canada, 1981.
- NASCIMENTO, M.L. **Controle multivariável de colunas de destilação de petróleo**. São Paulo, 130p., 1994, Dissertação (Mestrado em Eng. Química), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- RADEMAKER, O.; RIJNSDORP, J.E.; MAARLEVELD, A. **Dynamics and control of continuous distillation units**. Elsevier, New York, 726p., 1975.
- REZABEK, J. *Controlling process via fieldbus*. Chemical processing, Aug. 2001.