

CONTROLE AVANÇADO DE UMA UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE GÁS NATURAL

ADVANCED CONTROL OF A PROCESSING UNIT GAS

LINDIJANE AUDYNNE TARGINO DA SILVA

Engenheira Química (UFRN). Especialista em Eng. Petróleo e Gás. Universidade Potiguar.
E-mail: lindijane@gmail.com

Envio em: Agosto de 2013
Aceite em: Agosto de 2013

RESUMO

Este trabalho descreve as fases de implantação de um controlador avançado em uma Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN) com o objetivo de otimizar o processo. Possui foco principal na debutanizadora, que tem a finalidade de separar o propano e butano dos componentes mais pesados, produzindo GLP e C5+ (gasolina natural). O controle avançado será implantado para produzir mais GLP de forma otimizada sem o mesmo perder a especificação determinada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A identificação do sistema será baseada no modelo de primeira ordem com tempo morto (POTM), que será utilizado para verificar a influência das variáveis de processo (vazão de refluxo, pressão da torre, temperaturas de fundo e de topo, e nível da torre) no intemperismo do GLP. O controlador avançado (preditivo) utilizará o modelo POTM para prever o comportamento futuro da planta, e minimizará o erro de especificação de intemperismo, ao mesmo tempo em que maximiza a vazão de produção, portanto, otimizando o processo.

Palavras-chave: Controlador avançado. UPGN. Intemperismo. POTM. Gás Natural. GLP.

ABSTRACT

This work describes the implementation steps of a predictive controller in a Natural Gas Processing Plant (UPGN, Unidade de Processamento de Gás Natural) whose objective is optimize the production of Liquefied Petroleum Gas (LPG). The main focus is the debutanizer distillation column, which separates propane and butane of more weighted components, producing GLP and C5+ (natural gasoline). The predictive controller will be implemented to maximize LPG production, reducing losses and attending to its specification, regulated by ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). One of the main specification objectives is called intemperism (Pentanes & Heavier). The identification of the system will be based on the first order with delay time (POTM, Primeira Ordem com Tempo Morto) model. The process models will be used to quantify the influence of the process variables (reflux flow, distillation column pressure, top and botton temperature, and level) on the intemperism (Pentanes & Heavier) specification of LPG. The predictive controller will use POTM models to predict the future behavior of the plant, and will minimize the prediction error of intemperism (Pentanes & Heavier), while maximizes the production flow and the consumption of energy and utilities, therefore optimizing the process.

Keywords: Predictive Controller. Natural Gas Processing Plant. Intemperism (Pentanes & Heavier). First Order with Delay Time Models. Liquefied Petroleum Gas.

INTRODUÇÃO

As crises do petróleo nos anos 70 propiciaram uma revisão da política energética nacional, levando a uma substituição gradativa do petróleo importado. Para efetuar essa substituição, aumentou-se a produção do petróleo nacional e o incremento do uso do gás natural, projetando para esse combustível um importante papel no atendimento da crescente demanda de energia do Brasil. Assim, a possibilidade de utilização de uma energia menos poluente, eficiente e de baixo custo contribuiu, de forma simples e segura, para incentivar a produção e processamento deste combustível alternativo.

O processamento do gás natural é realizado em Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGNs), onde é desidratado e fracionado, gerando os seguintes produtos: metano e etano (que formam o gás processado ou residual); propano e butano (que formam o GLP - gás liquefeito de petróleo ou gás de cozinha); e um produto na faixa da gasolina, denominado C5+ ou gasolina natural (THOMAS, 2001). A UPGN é controlada para que os produtos gerados estejam dentro das especificações exigidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Neste trabalho, visou-se descrever as fases de um projeto de implantação de controle avançado em uma UPGN para otimização do processo.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA E CONTROLE AVANÇADO

A modelagem é a elaboração de equações matemáticas para representar um processo. Consiste na determinação de equações que descrevam o comportamento dinâmico do processo com um erro aceitável em uma faixa de operação de interesse. Geralmente, o modelo matemático é obtido a partir de um prévio conhecimento teórico da planta. Se o sistema é muito complexo ou não existe nenhuma literatura sobre o mesmo, então, pode-se descrever o seu comportamento utilizando equações diferenciais genéricas, por exemplo, e ajustando-se os coeficientes deste modelo, de forma que o comportamento do processo seja bem representado com um erro aceitável, para um conjunto de dados de entrada e saída medidos na planta. Isto se chama identificação de modelos.

No caso em estudo, a modelagem será baseada no modelo de primeira ordem com tempo morto (POTM), que pode ser facilmente identificado com testes simples na planta.

2.1 MODELOS DE 1ª ORDEM COM TEMPO MORTO

Nos projetos de controladores PID, frequentemente são utilizados os modelos de primeira e segunda ordem. Como dito anteriormente, neste estudo nos deteremos ao modelo de primeira ordem com tempo morto (POTM). Esse é o tempo decorrido entre o surgimento de um distúrbio e seu início de resposta. Durante o tempo morto, o controlador não responde aos distúrbios do processo, já que, ainda, não tomou conhecimento dos mesmos, ou não responde a modificações na saída do controlador.

O modelo de primeira ordem com tempo morto é dado por:

$$G(s) = \frac{k}{Ts+1} e^{-s\theta} \quad (4.1)$$

Em que:

k - ganho do processo;

T - constante de tempo do processo;

θ - tempo morto observado entre a modificação no sinal de entrada e a modificação na saída do processo.

Outros tipos de modelo podem ser utilizados para representar o sistema, tais como: modelos de segunda ordem, não-lineares, entre outros. Porém, o modelo de primeira ordem com tempo morto (POTM) é simples e suficiente em muitas situações.

Para a construção do modelo de primeira ordem com tempo morto (POTM) de um processo, pode-se executar a identificação em malha aberta ou em malha fechada. Um sistema está em malha aberta, quando a variável de processo não é afetada diretamente pela diferença entre a variável de saída e o valor de referência desejado. Já no sistema em malha fechada, a variável de processo é realimentada para comparação com a referência desejada, gerando um sinal de erro, que é analisado pelo controlador, que gera uma ação corretiva, quando necessário. A figura 9 representa um sistema em malha fechada e a figura 10, um em malha aberta.

2.1.1 MODELAGEM DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO COM INFLUÊNCIA NO INTEMPERISMO DO GLP

Este é um sistema MISO (Multiple-Input, Single-Output), pois é composto por cinco entradas e uma saída. A tabela, a seguir, apresenta os pares de variáveis de entrada e saída que devem ser modelados para o controlador avançado.

Figura 9 – Esquema de sistema em malha fechada

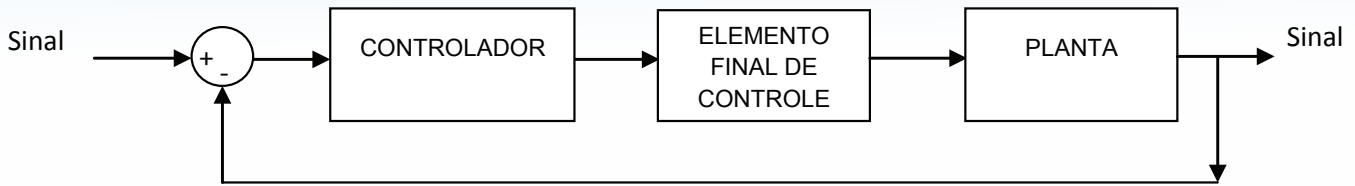


Figura 10 – Esquema de sistema em malha aberta

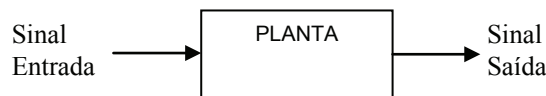


Tabela 4 – Pares de entrada e saída para serem modelados

Variável de Entrada	Sigla	Variável de Saída	Pares de
Variáveis Vazão de Refluxo	Q_R	Intemperismo	Y/QR
Pressão da Torre	P	Intemperismo	Y/P
Temperatura de Fundo	T_F	Intemperismo	Y/TF
Temperatura de Topo	T_T	Intemperismo	Y/TT
Nível da Torre	L_T	Intemperismo	Y/LT

Cada par de entrada e saída será representado por uma equação. Essas equações serão somadas, gerando o modelo do sistema para o intemperismo, o qual apresentará a influência de cada variável de entrada. O modelo POTM, representado pela equação (4.1), será discretizado para que os cálculos do controlador avançado possam ser realizados por computadores, isto é, no domínio do tempo discreto. Será utilizado o método das diferenças finitas (diferença por atraso) para a discretização das equações.

2.1.1.1 INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE REFLUXO NO INTEMPERISMO

Considerando a função de transferência do modelo POTM, equação (4.1), para influência da vazão de refluxo no intemperismo, tem-se:

$$\frac{Y_Q(s)}{Q_R(s)} = \frac{K_Q(s)}{T_q s + 1} e^{-s\theta_Q} \quad (4.2)$$

Em que:

Y_Q - variação incremental no intemperismo (a partir de um ponto de operação) para variação incremental na vazão de refluxo;

- razão entre a variação incremental no intemperismo e a variação incremental na vazão de refluxo;
- constante de tempo para variação incremental na

vazão de refluxo e variação no intemperismo;

- tempo morto do processo para variação incremental na vazão de refluxo e variação no intemperismo.

O modelo da equação (4.2) foi identificado utilizando-se dados de processo do sistema em estudo e foram descontados os valores de regime, ou seja, este é um modelo incremental. Normalmente, o modelo incremental é obtido a partir de dados de processo em que a média, ou o valor desejado de operação, foi descontada.

Desenvolvendo a equação (4.2):

$$Y_Q(s) = (T_Q s + 1) = Q_R(s) K_Q e^{-s\theta_Q} \quad (4.3)$$

$$s Y_Q(s) + \frac{1}{T_Q} Y_Q(s) = \frac{K_Q}{T_Q} Q_R(s) e^{-s\theta_Q}$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace à equação (4.3), e considerando-se condições iniciais nulas em torno do ponto de operação, obtém-se:

$$\frac{d}{dt} Y_Q(t) + \frac{1}{T_Q} Y_Q(t) = \frac{K_Q}{T_Q} q_R(t - \theta_Q) \quad (4.4)$$

Utilizando-se o método da diferença por atraso para aproximar a derivada, pode-se discretizar a equação (4.4), obtendo-se:

$$\frac{Y_Q(t) - y_Q(t - \Delta t)}{\Delta t} + \frac{1}{T_Q} y_Q(t) = \frac{K_Q}{T_Q} q_R(t - N_Q \Delta t) \quad (4.5)$$

Em que:

Δt - passo de discretização;

$N_Q = \frac{\Theta_Q}{\Delta t}$ (quantidade de passos de discretização correspondentes ao atraso).

Rearranjando a equação (4.5), obtém-se:

$$y_Q(t) = \frac{T_Q}{T_Q + \Delta t} y_Q(t - \Delta t) + \frac{K_Q \Delta t}{T_Q + \Delta t} q_R(t - N_Q \Delta t) \quad (4.6)$$

A equação (4.6) representa a variação incremental no intemperismo para uma variação incremental na vazão de refluxo.

2.1.1.2 INFLUÊNCIA DA PRESSÃO, TEMPERATURAS DE FUNDO E TOPO, E NÍVEL DA TORRE NO INTEMPERISMO

A modelagem da influência da pressão, temperatura de fundo, temperatura de topo e nível da torre no intemperismo segue os passos descritos para a variável vazão de refluxo (item 4.1.1.1). Seus modelos podem ser visualizados na tabela a seguir.

Tabela 5 – Modelos para as variáveis Pressão, Temperaturas de Fundo e Topo, e Nível da Torre

Variável de Entrada	Modelo	Equação
Pressão da Torre (P)	$y_p(t) = \frac{T_p}{T_p + \Delta t} y_p(t - \Delta t) + \frac{K_p \Delta t}{T_p + \Delta t} p(t - N_p \Delta t)$	(4.7)
Temperatura de Fundo (TF)	$y_{T_F}(t) = \frac{T_{T_F}}{T_{T_F} + \Delta t} y_{T_F}(t - \Delta t) + \frac{K_{T_F} \Delta t}{T_{T_F} + \Delta t} t_F(t - N_{T_F} \Delta t)$	(4.8)
Temperatura de Fundo (TT)	$y_{T_T}(t) = \frac{T_{T_T}}{T_{T_T} + \Delta t} y_{T_T}(t - \Delta t) + \frac{K_{T_T} \Delta t}{T_{T_T} + \Delta t} t_T(t - N_{T_T} \Delta t)$	(4.9)
Nível da Torre (LT)	$y_{L_T}(t) = \frac{T_{L_T}}{T_{L_T} + \Delta t} y_{L_T}(t - \Delta t) + \frac{K_{L_T} \Delta t}{T_{L_T} + \Delta t} l_T(t - N_{L_T} \Delta t)$	(4.10)

Em que:

K_p - razão entre a variação incremental no intemperismo e a variação incremental na pressão da torre;

K_{T_F} - razão entre a variação incremental no intemperismo e a variação incremental na temperatura de fundo;

K_{T_T} - razão entre a variação incremental no intemperismo e a variação incremental na temperatura de topo;

K_L - razão entre a variação incremental no intemperismo e a variação incremental no nível da torre;

T_p - constante de tempo para variação incremental na pressão da torre e variação no intemperismo, isto é, aproximadamente a quarta parte do tempo que o intemperismo leva para estabilizar, quando a pressão da torre varia em forma de degrau;

T_{T_F} - constante de tempo para variação incremental na temperatura de fundo e variação no intemperismo, isto é, aproximadamente a quarta parte do tempo que o intemperismo leva para estabilizar, quando a temperatura de fundo varia em forma de degrau;

T_{T_T} - constante de tempo para variação incremental na temperatura de topo e variação no intemperismo, isto é, aproximadamente a quarta parte do tempo que o intemperismo leva para estabilizar, quando a temperatura de topo varia em forma de degrau;

T_L - constante de tempo para variação incremental no nível da torre e variação no intemperismo, isto é, aproximadamente a quarta parte do tempo que o intemperismo leva para estabilizar, quando o nível da torre varia em forma de degrau;

Δt - passo de discretização;

$N_p = \frac{\Theta_p}{\Delta t}$ (quantidade de passos de discretização correspondentes ao atraso Θ_p).

$N_{T_F} = \frac{\Theta_{T_F}}{\Delta t}$ (quantidade de passos de discretização correspondentes ao atraso Θ_{T_F}).

$N_{T_T} = \frac{\Theta_{T_T}}{\Delta t}$ (quantidade de passos de discretização correspondentes ao atraso Θ_{T_T}).

$N_{L_T} = \frac{\Theta_{L_T}}{\Delta t}$ (quantidade de passos de discretização correspondentes ao atraso Θ_{L_T}).

A variação incremental total do intemperismo é dada pela soma das variações incrementais do intemperismo para modificações na vazão de refluxo, na pressão, nas temperaturas de fundo e de topo, e no nível da torre, equações (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10) respectivamente.

$$y_{TOTAL}(t) = y_Q(t) + y_P(t) + y_{T_F}(t) + y_{T_T}(t) + y_{L_T}(t) \quad (4.11)$$

Substituindo as equações (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10) na equação (4.11), obtém-se o modelo final para a variação incremental total do intemperismo.

Normalmente, variações no nível da torre influenciam pouco o intemperismo, desde que a massa no interior da torre seja compatível com a carga térmica do refeedor. Assim, é comum desprezar essa variável no modelo do intemperismo. Além disso, a vazão de refluxo e a temperatura de topo são fortemente relacionadas. Neste caso, é comum o modelo do intemperismo utilizar apenas uma dessas variáveis.

De posse do modelo, equação (4.12), o controlador avançado pode otimizar o processo, ou seja, minimizar o erro de previsão futuro do intemperismo, ajustando as entradas (Q_R, P, T_F, T_T e L_T) para produzir mais GLP, atendendo à sua especificação.

2.2 CONTROLE AVANÇADO

Para o projeto do controlador avançado, assume-se que a instrumentação, incluindo os atuadores, e o controle regulatório (PID) estão operando adequadamente.

O controle preditivo baseado em modelo (MPC) designa um conjunto de métodos de controle que utiliza um modelo para prever o comportamento futuro do processo. O projeto de MPC necessita de um modelo capaz de representar o comportamento real do processo de forma satisfatória na faixa de operação de interesse. As formas de modelagem mais, comumente, encontradas na literatura envolvem a representação do processo por meio de sua resposta ao impulso, resposta ao degrau, função de transferência ou no espaço de estados. A sequência de controle é obtida pela otimização de um critério de custo que minimiza o erro de rastreamento das referências, ao mesmo tempo em que penaliza o esforço de controle necessário para atuar no sistema. Da sequência de controle ótima, apenas o primeiro elemento é efetivamente aplicado ao processo. No instante de amostragem seguinte, o procedimento previsão-otimização é repetido, utilizando-se as novas medições disponíveis das variáveis da planta (CAMACHO E BORDONS, 1999).

De acordo com o conceito de MPC, o projeto do controlador avançado possibilita, utilizando a equação abaixo, minimizar o erro futuro do intemperismo, ao mesmo tempo em que pondera o consumo de utilidades e de energia para atuar na planta.

$$\min \sum_{t=0}^{t=F} \lambda_1 e_y^2(t) + \lambda_2 c(t) + \lambda_3 en(t) \quad (4.13)$$

Em que:

F - tempo futuro;

e_y - erro do processo para a variável de saída intempe-

rismo;

$C(t)$ - consumo de utilidades;

$en(t)$ - energia para atuar na planta (esforço de controle);

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - ponderações do erro do intemperismo, do consumo de utilidades e do consumo de energia para atuar na planta.

O consumo de utilidades em uma planta industrial considera ar, água, vapor de água, dentre outros, e deve ser minimizado. A energia para atuar na planta, da mesma forma, também deve ser minimizada.

O erro utilizado na equação (4.13) é dado pela diferença entre o intemperismo desejado (y_{SP} , especificado pela ANP) e a soma do intemperismo atual (y_{ATUAL}) com a variação incremental total determinada pelo controlador avançado (y_{TOTAL}).

$$e_y(t) = y_{SP}(t) - (y_{TOTAL}(t) + y_{ATUAL}(t)) \quad (4.14)$$

O intemperismo atual () pode ser obtido através de inferência ou cromatografia. Utilizar inferência para deduzir alguma coisa significa dizer que, a partir da análise de algumas proposições explícitas, pode-se concluir uma ou mais proposições implícitas.

A equação (4.14) pode ser utilizada para todo o período que se deseja estudar, ou seja, todo horizonte futuro de interesse.

De posse das informações descritas anteriormente, pode-se observar que o controlador preditivo é baseado em estratégia de horizonte futuro, ou seja, a partir dos modelos POTM da influência das variáveis de entrada (Q_R, P, T_F, T_T e L) no intemperismo, procura-se prever o comportamento futuro do processo, respeitando-se as restrições operacionais do sistema, e minimiza-se o erro da variável que se deseja controlar (intemperismo) utilizando novas informações medidas na planta.

As restrições operacionais para o sistema em estudo podem ser: limites de temperatura, limite da vazão de refluxo, limite de especificação do intemperismo, limite de carga térmica do refeedor, a pressão da torre, entre outras. Todas essas restrições devem ser respeitadas no projeto do controlador preditivo para esse processo. O problema de otimização (equação 4.13), se sujeito a restrições, tornar-se-ia:

$$\min \sum_{t=0}^{t=F} \lambda_1 e_y^2(t) + \lambda_2 c(t) + \lambda_3 en(t)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} 0 < Q_R < Q_{RMAX} \\ T_{FMIN} < T_F < T_{FMAX} \\ P < SP_{LQ} \\ CT_R < CT_{RMAX} \\ LT_{MIN} < L_T < L_{TMAX} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Em que:

Q_R – vazão de refluxo;

$Q_{R_{MAX}}$ – vazão máxima da bomba de refluxo;

T_F – temperatura de fundo;

$T_{F_{MIM}}, T_{F_{MAX}}$ – temperatura de fundo mínima e máxima;

P_T – pressão da torre;

SP_{LQ} – set-point de abertura da linha do queimador;

CT_R – carga térmica do refeedor;

$CT_{R_{MAX}}$ – carga térmica máxima do refeedor;

L_T – nível da torre;

$L_{T_{MIM}}, L_{T_{MAX}}$ – níveis mínimo e máximo permitidos para operação da torre.

Essas são algumas das restrições existentes em um problema de controle avançado real. Outros limites do processo de destilação podem ser identificados e incorporados a este problema, como, por exemplo, limites de vazão de carga, entre outros.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou a metodologia para implantação de um controlador avançado para otimização do processo de uma Unidade de Processamento de Gás Natural. No caso em estudo, o processo envolveu a torre desbutanizadora como equipamento principal, vislumbrando a otimização na produção do GLP. Basicamente, a metodologia consiste em reavaliar a instrumentação da planta, reavaliar o controle regulatório (PID) da planta, desenvolver modelos matemáticos levando em conta a influência das variáveis de processo: vazão de refluxo, pressão, temperaturas de fundo e de topo, e nível da torre no intemperismo do GLP, e definir as restrições operacionais do processo. O método utilizado para modelar o processo foi o POTM, que é bastante satisfatório em muitas situações, e, frequentemente, utilizado nos controladores PID.

Apesar da complexidade do processo de destilação, em muitas situações a metodologia apresentada pode ser aplicada. Estudos mostram que a técnica de controle avançado apresenta ganhos econômicos para os processos em que são empregados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>> Acesso em: 01 abr.2009.
- ALMEIDA NETO, E. A. **Controle Preditivo Multimodelos de uma Torre Debutanizadora**. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. **Model Predictive Control**. Springer-Verlag: UK, 1999.
- CARRAPIÇO, O. L. **Controle Preditivo de Horizonte Infinito para Processos Integradores com Tempo Morto**. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- CAMPOS, M. C. M. M. de; TEIXEIRA, H. C. G.: **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. São Paulo: Editora Blucher, 2006.
- COMPOSIÇÃO do gás automotivo. **Demec**, Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/gasosos/gnatural/caracter.htm>> Acesso em: 09 jul.2009.
- FOUST, A. L. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A.,1982.
- GOMIDE, R. **Operações Unitárias**. São Paulo : Gomide, 1988. V. 4.
- MOREIRA, V. D. **Controle Preditivo Robusto de Sistemas Híbridos Incertos Integrando Restrições, Lógica, e Dinâmica Baseada em Séries de Funções Ortonormais**. Tese (Doutorado)- UNICAMP, Campinas, SP, 2006.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, Brasil, 2000.
- ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006.
- THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, 2. Ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.
- UNIDADE de Processamento de Gás Natural da Petrobrás - Guamaré/RN. **Ponto SBR**. Disponível em: <<http://www>>

pontosbr.com/detalhes.php?cod=896> Acesso em: 21 jul.2009.

YAMANISHI, E. **Simulação, Análise e Otimização das Colunas Atmosférica e Debutanizadora da Unidade de Destilação de Refino de Petróleo.** Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP. Campinas, SP, 2007.