

## INSTRUMENTAÇÃO EM COLUNA DE DESTILAÇÃO PARA FIM DE CONTROLE

Thiago Tonon<sup>1\*</sup>, Murilo Silva Colombo<sup>2</sup>, Cid Marcos Gonçalves Andrade<sup>2</sup>

1 – Instituto Federal do Paraná – Campus Paranavaí – IFPR – PR, [thiago.tonon@ifpr.edu.br](mailto:thiago.tonon@ifpr.edu.br)

2 - Universidade Estadual de Maringá – UEM, Maringá – PR

*Resumo - Este trabalho apresenta o estudo de instrumentação e controle aplicados a uma coluna de destilação. A coluna de destilação é um dos principais componentes utilizados em processos químicos. A separação dos componentes da mistura está baseada nas diferenças de volatilidade dos componentes. Dessa maneira, conhecer exatamente a temperatura que cada segmento de uma coluna de destilação está operando proporciona uma qualidade no produto destilado, pois se torna possível ainda desenvolver sistemas automáticos de controle. Dessa maneira, quando se estuda projetos de controle e automação de colunas de destilação, é comum a colocação de grande número de sensores de temperatura. Para a validação da proposta, uma aplicação prática foi desenvolvida em uma coluna de destilação presente no laboratório do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Estadual de Maringá. Para a validação, uma instrumentação da coluna foi desenvolvida utilizando dispositivos de baixo custo.*

*Palavras-chave: Controle em Coluna de Destilação, Instrumentação de Coluna de Destilação, Arduino, Sensor de Temperatura DS18B20.*

### Introdução

Devido ao evidente aumento da concorrência global no desenvolvimento de produtos, a necessidade de operar uma planta de processo de maneira a buscar a maximização do desempenho econômico é objeto de grande importância, para a sobrevivência de qualquer empresa. O desempenho econômico otimizado depende da interação de várias decisões que afetam a operação da planta [1,2].

Uma performance estável e com maior produtividade das operações unitárias é essencial, afetando diretamente o aspecto econômico. Por isso, a necessidade do desenvolvimento de sistemas de controle robustos se torna evidente, já que esses objetivos requerem ações perante às perturbações inerentes à operação da planta.

As torres de destilação em particular podem ter comportamento instável perante perturbações ou até mesmo às condições físicas de operação (correntes, energia). É primordial, na maior parte das aplicações industriais desta operação unitária, o controle das variáveis do processo.

Este trabalho tem como finalidade apresentar os aspectos relacionados aos sistemas de controles para torres de destilação, além de apresentar os resultados obtidos na instrumentação de uma torre experimental.

### Torre de Destilação Binária

Uma torre de destilação binária é aquela na qual se alimenta uma mistura miscível com 2 componentes. Seu objetivo é separar esses dois compostos químicos, sendo a força motriz para tal operação a diferença de volatilidade entre os mesmos. Este equipamento opera a partir do aquecimento de uma mistura, com o intuito de formar duas fases, sendo uma líquida e outra vapor, para que haja o transporte de massa entre as fases, formando, no topo e no fundo, correntes com um grau de pureza maior do que foi alimentado na coluna.

Para aumentar a eficiência da separação, diversas divisões internas da coluna são construídas. As divisões da coluna são denominadas pratos. Em cada um destes pratos, há a formação de vapor e líquido em, teoricamente, equilíbrio termodinâmico. Ocorre também, com maior propensão, transporte de massa do mais volátil à fase vapor e do menos volátil à fase líquida. O aquecimento da torre ocorre em um refeedor fora da coluna. O vapor gerado é realimentado no último estágio dentro da coluna. Deste estágio sai outra corrente, o produto de fundo (*B*), que é rico no componente

menos volátil. É recomendado realizar refluxo da corrente de topo (destilado,  $D$ ), após passagem ao condensador, que aumenta a concentração do mais volátil na corrente  $D$ , aumentando sua pureza.

### ***Como Controlar uma Torre de Destilação Binária***

A hierarquia de controle se dá em dois níveis, a camada regulatória de cima é baseada nos graus de liberdade de regime permanente e as variáveis controladas primárias pareadas àqueles, e sua função é disponibilizar à camada de baixo *setpoints* ótimos para operação. A camada de baixo pressupõe análise dinâmica para definir a estrutura do controlador e escolha de variáveis controladas secundárias e seu objetivo é manter as variáveis controladas em seus respectivos *setpoints* [3, 5].

Na modelagem da camada superior, o número de graus de liberdade do estado estacionário ditará quantas variáveis deverão ser controladas. Um modelo não-linear da planta de estado estacionário deverá ser usado para otimizar economicamente a torre em relação aos graus de liberdade das perturbações. A otimização econômica se inicia com a determinação da função escalar de custos da torre, que tem, comumente, o seguinte perfil, descrito na Eq. 1:

$$J = \text{custo da alimentação} - \text{valor dos produtos} + \text{custo da energia térmica} \quad (1)$$

É importante determinar restrições ativas, já que as mesmas devem ser obedecidas para um controle eficiente da torre. A análise dessas restrições requer estudo do custo de energia e efeito das mesmas na performance do controlador. Para os graus de liberdade irrestritos, utiliza-se a metodologia de variáveis auto-otimizadoras (*self-optimizing variable*), já que quando fixadas em um *setpoint* invariável, uma operação da torre próxima do ideal é atingida [3].

A segunda camada regulatória tem como objetivo principal estabilizar a torre, e evitar instabilidades. Isso é realizado escolhendo-se variáveis controladas extras ( $y_2$ ) que influenciarão as variáveis manipuladas ( $u_2$ ). A seleção das variáveis de controle secundárias (da segunda camada) deve ser feita de tal maneira que não se introduza instabilidades na camada superior. Consequentemente, na hierarquia de baixo as estruturas de controle trabalham com loops mais rápidos [3].

### ***Modelagem da camada superior de controle***

Para a modelagem da camada regulatória superior, inicialmente, realiza-se uma análise de custos internos inerentes à torre de destilação, para determinar os objetivos de controle primários. A execução de tal análise se dá pela função custo que, para uma torre binária, geralmente é a seguinte função:

$$J = p_F F - p_D D - p_B B + p_c |Q_c| + p_h |Q_h| \quad (2)$$

em que  $p_i$  é o preço da corrente ou do custo da energia térmica [3].

Como mencionado anteriormente, essa função custo deve ser otimizada em relação aos graus de liberdade e também sob as restrições de operação da torre [3].

As torres de destilação binária têm 4 graus de liberdade de estado estacionário (sendo vazão de alimentação, pressão e as 2 composições). Assume-se que a vazão  $F$  é uma perturbação, e que a pressão deve ser mantida em um valor pré-estabelecido. Restam então 2 graus de liberdade (as composições) [3].

O controle das composições depende de uma análise cuidadosa do custo da energia térmica, das restrições de capacidade e da purificação dos produtos. A partir desta análise, decide-se se o controle das composições é feita por 2 ou 1 ponto (*two-point* ou *one-point*) [3].

## ***Modelagem da camada inferior de controle***

Uma torre binária, com uma determinada vazão  $F$ , tem 5 graus de liberdade de controles dinâmicos (variáveis manipuladas, *inputs*  $u$ ), sendo elas o refluxo  $L$ , a vazão do refeedor  $V$ , o produto de topo  $D$ , o produto de fundo  $B$ , e o vapor de topo  $V_T$  [3].

As correntes  $V$  e  $V_T$  são controladas pelos calores fornecidos pelo refeedor e pelo condensador. É necessário também controlar os níveis dos líquidos  $M_D$  e  $M_B$  (no reservatório do condensador e no último estágio da torre, respectivamente), para se atingir operação estável. Além desses, a estabilidade também depende do controle de pressão na torre, é aconselhável se manter um *loop* de controle nesta variável com curta escala de tempo [3].

Com todas essas variáveis controladas, possivelmente a torre ainda teria comportamento instável, então deve-se utilizar um controle em malha fechada na temperatura dentro da coluna, também com relativamente pequena constante de tempo. Depois de fechar todos os loops nestas variáveis, resta a vazão  $F$  como um grau de liberdade não utilizado [3].

## ***Controle de nível de líquido***

Há diversas possíveis configurações para se controlar os níveis de líquido dos reservatórios. Por exemplo, a configuração  $LV$ , em que  $D$  controla o nível de líquido do condensador e  $B$  controla o nível de líquido no último prato da coluna, e assim sucessivamente, como as configurações  $DB$  ou as de dupla razão, por exemplo  $(L/D)$   $(V/B)$  [4].

A recomendação é de se utilizar a maior vazão para o controle de nível. Como consequência, se  $L/D < 1$  deve-se utilizar a vazão de destilado  $D$  para controle ou o refluxo  $L$  se  $L/D > 1$ . Portanto a configuração  $LV$  não é recomendada para torres com alta razão de refluxo ( $L/D > 6$ ). Essas regras também são aplicáveis ao controle do produto de fundo e do refeedor. Vale ressaltar que caso haja no controlador um loop de temperatura, essas regras não são válidas, já que o loop de temperatura indiretamente controla o nível dos líquidos [3].

## ***Controle de Temperatura***

A prática mais comum para efetuar o controle da coluna é a utilização de um controle da temperatura dos pratos. Este controle permite a estabilização do perfil das composições, permitindo a estabilização da coluna pois, mesmo com o controle de nível e pressão, ainda pode ocorrer um comportamento instável. Além disso, faz com que o problema de composição seja menos interativo (em termos de RGA), tornando possível um melhor controle de composições por dois. E, por fim, torna o comportamento da coluna mais linear [3].

Com todos esses benefícios de se controlar a temperatura da torre, fica evidente a necessidade de se utilizar sensores de temperatura nos pratos para facilitar e estabilizar a operação da torre. Já a localização desses sensores, e o uso ou não de sensores redundantes, também compreende parte importante do processo decisório da modelagem do sistema de controle da torre, conforme será detalhado a seguir.

## **Experimental**

Os estudos na área de instrumentação, otimização e controle fornecem possibilidades de otimização de resultados. A modelagem de sistemas físicos permite uma análise computacional do comportamento do sistema, possibilitando a busca pelo ótimo antes da implementação de qualquer solução estudada. No entanto, o comportamento dinâmico dos sistemas físicos e as aproximações matemáticas ocasionalmente utilizadas durante o modelamento faz com que os resultados práticos necessitem ser realizados afim de validar os projetos. Nesse sentido, a realização de experimentos práticos neste trabalho validará os conceitos teóricos que serão abordados.

A coluna de destilação que será utilizada para a validação das propostas deste trabalho está localizada no laboratório do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá. Esta coluna possui 15 pratos, além de um condensador resfriado com água corrente. O Aquecimento do refeedor é feito a partir de 3 resistências elétricas com potência total de 5500 W. A vantagem na utilização deste tipo de aquecimento está no processo de controle de temperatura. A Fig 1 apresenta a coluna de destilação que será implementada as propostas deste trabalho.



Figura 1 - Coluna de Destilação Piloto do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá

Desenvolver equipamentos que possibilitam a validação prática de estudos na área de instrumentação, controle e otimização requer conhecimentos e tempo que em alguns casos os pesquisadores não dispõem. Além do mais, a busca por sistemas aplicados a uma solução nem sempre podem ser utilizadas para outros estudos. Dessa maneira, todo o desenvolvimento prático deste trabalho foi realizado com equipamentos de baixo custo e fácil implantação de novos recursos, a fim de facilitar futuros pesquisadores do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá.

O Microcontrolador utilizado para a realização deste trabalho foi o Arduino UNO, que é uma plataforma de prototipagem eletrônica, do tipo *open-source*, que permite o desenvolvimento de sistemas eletrônicos. Neste equipamento, é possível encontrar o processador de dados, uma entrada USB para comunicação e um conector para conexão de uma fonte de alimentação externa. Além disso, possui já embarcado os recursos necessários para o *bootloader*.

O sensor de temperatura utilizado neste trabalho foi o termômetro digital DS18B20, fabricado pela *Dallas Semiconductor*. Este componente é um termômetro encapsulado com um circuito integrado. O circuito integrado que integra este equipamento realiza a conversão do sinal de temperatura medido e efetua a transmissão da informação através de um protocolo de comunicação *1-Wire*.

A utilização deste componente é justificada pelo seu tamanho reduzido, e pela maneira como este componente transmite a informação. Ele possui 3 terminais, sendo dois deles para a alimentação e um para a comunicação digital. Cada componente possui um endereço e, graças ao seu protocolo de comunicação, teoricamente infinitos sensores podem ser instalados no mesmo barramento, permitindo a utilização de somente 1 porta de comunicação.

## Resultados e Discussões

A instrumentação da coluna foi desenvolvida, buscando a fixação dos sensores de temperatura no lado exterior da torre. A partir da fixação dos sensores a coluna foi colocada em operação com o intuito de verificação do comportamento dos sensores de temperatura.

Todos os sensores ficaram continuamente coletando informações de temperatura durante todo o tempo de operação. Os dados foram coletados pelo Arduino e enviados para o computador, que gerou um banco de dados com a data e a hora da coleta, e a temperatura de cada prato.

Para o desenvolvimento de uma rede de sensores, capaz de realizar a leitura da temperatura de cada prato, uma placa com os sensores de temperatura foi desenvolvida, buscando uma rápida instalação, facilidade em realizar manutenções e principalmente uma excelente organização para os cabos de alimentação e comunicação. A posição dos sensores no vidro foi determinada considerando a altura de líquido formada dentro de cada prato, pois a transferência de calor para o vidro a partir do líquido é mais efetiva em relação à transferência a partir do vapor.

Considerando que a instrumentação realizada neste sistema será permanente, e considerando que o objeto de estudo deste trabalho visa a instalação de uma rede mínima de sensores, as placas foram desenvolvidas com a possibilidade de habilitar ou desabilitar fisicamente qualquer sensor de temperatura. Para tal, foi instalada em cada placa uma chave DIP de 4 vias. A Fig. 2 apresenta com detalhe da placa de sensores com a chave.



Figura 2 – Chave DIP e borne de ligação da Placa de Sensores.

Os equipamentos destinados para a coleta das informações, processamento dos dados e envio para a armazenagem foram instalados em uma caixa blindada, fabricada em ABS, para a proteção da ação de agentes corrosivos, vapores e líquidos. Eles foram alojados ao lado da torre de destilação e aqui será chamado de módulo eletrônico. No módulo eletrônico, existe uma fonte de alimentação, um regulador de tensão LM2596, um Arduino UNO, um módulo Ethernet, um relógio digital DS1302 e um módulo SDCard.

O armazenamento dos dados externamente ao Arduino permite que usuários possam obter as informações das leituras da operação da coluna, permitindo o estudo em laboratório em diversas disciplinas do programa. A vantagem desta técnica é que os alunos ou pesquisadores não precisam acessar diretamente os dados do Arduino, garantindo confiabilidade dos dados. Com as informações salvas em um servidor de dados, os acessos às informações podem ser simultâneas.

A coluna de destilação foi colocada em operação por um período de 2h30 para a coleta dos dados de operação. Os dados foram coletados com uma taxa de amostragem de 10s e foram salvos em um servidor de dados. Posteriormente, os dados foram importados no software *Matlab*, para a geração de gráficos. A contagem dos pratos segue a sequência descendente, sendo o Prato 01 como o prato superior da coluna e o Prato 15 o prato inferior. A Fig 3 apresenta o comportamento da temperatura do prato 01, prato 07 e prato 15, além da temperatura do líquido refeedor.

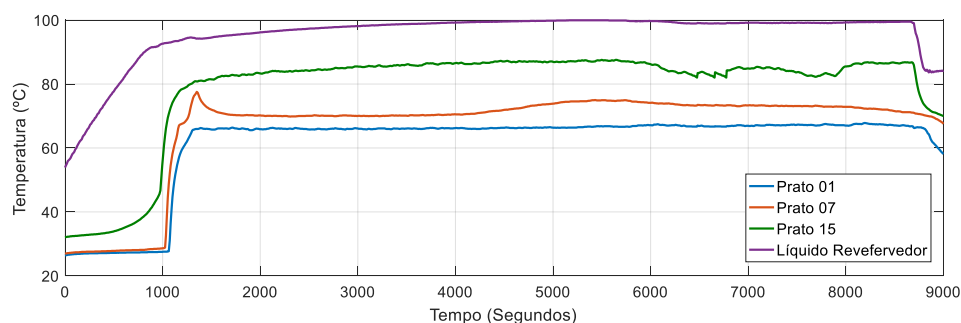


Figura 3 – Temperatura Prato 01, Prato 07, Prato 15 e Líquido do Refervedor

No início da operação do sistema, o líquido reverfedor havia sido pré-aquecido por 30min. O prato 15, o mais próximo da entrada de vapor do revedor, mantém um perfil de temperatura maior em relação aos outros. A Fig 4 apresenta a temperatura de todos os pratos.

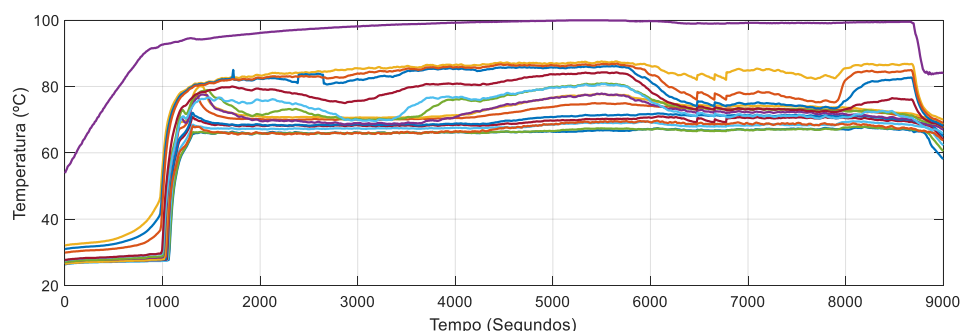


Figura 4 – Temperatura de todos os pratos e do Líquido do Refervedor

Durante a operação da coluna, algumas ações de controle foram executadas, com o intuito de verificar o comportamento dinâmico do sistema. Como esta operação buscava a visualização do comportamento da coluna e dos sensores de temperatura, não houve a busca ideal pela melhor configuração de temperaturas para uma excelente separação do álcool. Ao contrário, foi executado testes com o aumento e a diminuição da potência das resistências de aquecimento do líquido justamente para a validação desta instrumentação.

A Tabela 01 apresenta o tempo de operação e a ação que foi tomada.

Tabela 01 – Ações executadas durante a operação e a ação que foi tomada.

<b>Ações</b>	<b>Tempo (Segundos)</b>
Início da formação do vapor em alguns pratos	840
Formação de vapor completo em todos os pratos	1140
Abertura da circulação da água	1400
Início da circulação da mistura de entrada	5640
Redução da potência das resistências de aquecimento do revedor (de 4400W para 4000W)	6240
Aumento da potência das resistências de aquecimento do revedor (de 4000W para 4200W)	6540
Aumento da potência das resistências de aquecimento do revedor (de 4200W para 4320W)	6960
Redução da potência das resistências de aquecimento do revedor (de 4320W para 4100W)	7140
Fim da circulação da mistura de entrada	7860
Desligamento total das potências de aquecimento	8700
Fim do processo	9000

A Fig 4 apresenta o comportamento do líquido do refeedor, com ênfase em algumas características da operação. Conforme a Tabela 1 e observado a Fig 4, é possível perceber um decréscimo na temperatura a partir do momento em que há a diminuição na potência de alimentação das resistências de aquecimento, como esperado. A temperatura passa a sofrer variações conforme houve variação na potência de alimentação das resistências.

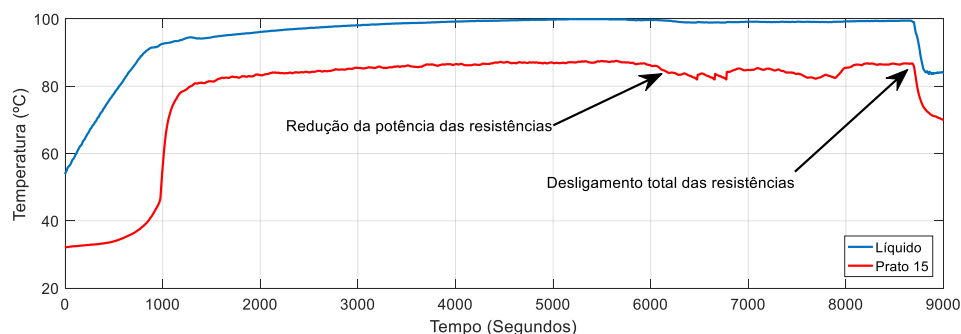


Figura 4 – Temperatura do Líquido do Refeedor, conforme a variação na potência de alimentação

A variação na ordem aproximada de 10% na potência de alimentação do refeedor gerou uma variação significativa na temperatura dos pratos inferiores, mostrando uma instabilidade, justificando a necessidade de um controle automático para efetuar a operação da coluna, de maneira a buscar o melhor resultado de operação da coluna de destilação.

## Conclusão

Este trabalho apresentou uma abordagem para o controle de coluna de destilação, além do desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de uma coluna pertencente ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, com o objetivo de obter dados de temperatura de todos os pratos e do líquido refeedor, possibilitando o estudo e desenvolvimento de um sistema automático de controle. Além disso, o protótipo foi concebido com o ideal de possibilitar futuros trabalhos e pesquisas, com a busca por dispositivos de baixo custo e fácil implementação de novos recursos. Os equipamentos e recursos utilizados na instrumentação da coluna foram selecionados visando um custo de implantação quem imaginamos ser de baixo custo, quando comparado com sistemas comercialmente disponíveis para este fim.

O sistema desenvolvido apresentou resultados esperados, e através dele foi possível observar o comportamento da temperatura de todos os pratos da coluna de destilação. A partir desta observação, variações na potência do refeedor puderam ser executadas e coletadas informações sobre o comportamento dos pratos. Finalmente, será desenvolvido um controlador automático visando a qualidade de um produto final, com a redução dos custos de produção.

## Referências

1. S. SKOGESTAD, Economic Plantwide Control, John Wiley & Sons Ltd, Malaysia, 2012.
2. S. ENGELL, Feedback Control for Optimal Process Operation. Journal of Process Control. 2007, 17(3), 203 – 219.
3. S. Skogestad. The Dos and Don'ts of Distillation Column Control. Chemical Engineering Research and Design. 2007, 85 (A1), 13-23.
4. S. Skogestad; P. Lundstrom; E. W. Jacobsen. Selecting the Best Distillation Control Configuration. AIChE Journal. 1990, 36(5), 753-764.
5. R. Yelchuru, Ph.D. Quantitative Methods for Controlled Variables Selection. Norwegian, University of Science and Technology, 2012.