

# Automação e controle em aparelhos de destilação de álcool - Uma visão crítica

André Ribeiro Lins de Albuquerque  
Doutor em Engenharia Mecatrônica - USP  
Professor da Faculdade Politécnica de Matão  
e-mail: andre@pentagro.com.br

Cláudio Adriano Policastro  
Doutorando em Computação - USP  
Mestre em Computação pelo ICMC - USP  
Pentagro Soluções Tecnológicas Ltda.  
e-mail: claudio@pentagro.com.br

## Resumo

A tecnologia atual no processo de destilação é capaz de apresentar uma eficiência na extração de álcool superior a 99%, porém, outros fatores de desempenhos como gastos energéticos, produtividade e qualidade no produto final poderiam apresentar melhores resultados. Este trabalho apresenta uma visão crítica da tecnologia de automação e controle encontrada em Usinas de Álcool, apresentando e sugerindo melhores técnicas e abordagem para otimizar o desempenho das mesmas. Além disso, para contextualizar os argumentos apresentados no artigo, são analisados e estudados alguns dados reais das variáveis de processo de um aparelho de destilação.

**Palavras-chave:** Destilação, Álcool, Automação, Controle, Processos

## Introdução

O processo de destilação encontrado atualmente - assim como todo o processo industrial sucroalcooleiro - nas usinas de álcool tem evoluído graças a iniciativas de empresas privadas. Poucos incentivos a inovação foram dados para este segmento. Talvez por isso, que áreas do conhecimento como a de controle de processo estejam tão aquém do que poderiam estar.

Apesar da tecnologia atual no processo de destilação apresentar uma eficiência na extração de álcool superior a 99%, a energia necessária para a produção poderia ser melhor aproveitada, pois as variáveis do

## Abstract

The current technology in the distillation process is capable to present the alcohol extraction efficiency upper than 99%, however, others performance factors such as energy expenses, productivity and quality in the final product could present better results. This work presents a critical vision of the automation and control technology applied in alcohol plants, presenting and suggesting better technical and approaches to optimize their performance. This article also analyzes and studies some real data of the distillation processes variables.

**Key-words:** distillation; alcohol, automation, control, process.

processo apresentam uma alta variabilidade (em muitas delas acima de 10%), denotando uma ineficiência no controle de operação do processo, acarretando um gasto desnecessário de energia (retificação do álcool) para realizar o trabalho.

Além do fator energético, outro fator de desempenho que ainda pode ser melhorado é o relativo à produtividade. Isso porque, em muitos momentos de uma safra de cana-de-açúcar, o “gargalo” deixa de ser a matéria prima passando a ser os aparelhos de destilação. Desta forma, há a necessidade de uma tecnologia de controle que permita que o processo opere em uma condição de máxima economia de energia em

determinadas situações (escassez de matéria prima, por exemplo) ou na condição de produção máxima para situações de excesso de material a ser destilado. Corroborando com isso, existe ainda o risco de contaminação da matéria prima, exigindo que a mesma seja moída num prazo máximo de trinta e seis horas após o corte, evitando assim, a deterioração do caldo.

As colunas de destilação em usinas de álcool, onde se aplica este artigo, necessitam de sistemas de controle capazes de rejeitar flutuações que ocorrem com frequência, mesmo quando o processo opera em regime permanente. Características intrínsecas à destilação, como a dinâmica lenta e interação entre as malhas de controle, promovem elevados períodos de transição quando o processo é perturbado. Estes períodos de transição acabam por provocar a redução no rendimento do processo.

Nos sub-capítulos a seguir, são apresentados conteúdos específicos que contemplam as áreas de conhecimento relevante ao presente trabalho, assim como uma breve revisão bibliográfica sobre os presentes tópicos que são: o processo produtivo de açúcar e álcool; processo de destilação; sistemas de controle na destilação; controle avançado de processos; identificação e modelagem.

### **Processo produtivo de açúcar e álcool**

A colheita da cana-de-açúcar é feita manualmente com facões ou por cortadeiras mecânicas e, então, a cana é transportada para as indústrias por meio de caminhões adaptados para este tipo de tarefa. Na usina, a cana-de-açúcar é descarregada em pátios de armazenagem ou diretamente em mesas alimentadoras, para que seja efetuada a extração da sacarose (Hugot, 1977).

Após ser descarregada nas mesas alimentadoras, a cana-de-açúcar passa por um processo de lavagem e, logo após, é conduzida, por meio de esteiras rolantes, para picadores e desfibradores; esta etapa é também conhecida como “preparo da cana”. Do ponto de vista industrial, a cana-de-açúcar pode ser considerada como a soma de bagaço e caldo extraído. A extração ainda é efetuada, na maioria dos casos, via esmagamento da cana-de-açúcar pelos rolos das moendas, que exercem uma forte pressão sobre a mesma. O resíduo deste processo é o bagaço, que é direcionado para as caldeiras, onde é utilizado como combustível. O caldo resultante da extração passa por diversas etapas de processamento antes de se tornar um produto como açúcar ou álcool. Os processos envolvidos podem ser definidos

basicamente, como:

- 1) Extração: extração do caldo;
- 2) Geração de vapor a partir do bagaço;
- 3) Clarificação: sulfitação, aquecimento, decantação e filtração;
- 4) Evaporação: evaporação do caldo para a fabricação de açúcar;
- 5) Fabricação de Açúcar: cozimento da massa, cristalização e centrifugação do açúcar;
- 6) Fermentação: fermentação do caldo para a fabricação do álcool;
- 7) Tratamento de levedura: tratamento, centrifugação e secagem da levedura utilizada na fermentação;
- 8) Destilação: destilação, retificação e desidratação do álcool;
- 9) Armazenamento: secagem, ensaque e armazenagem do açúcar e álcool.

Como no Brasil as unidades sucroalcooleiras não se diferenciam muito umas das outras, as descrições acima podem ser consideradas gerais.

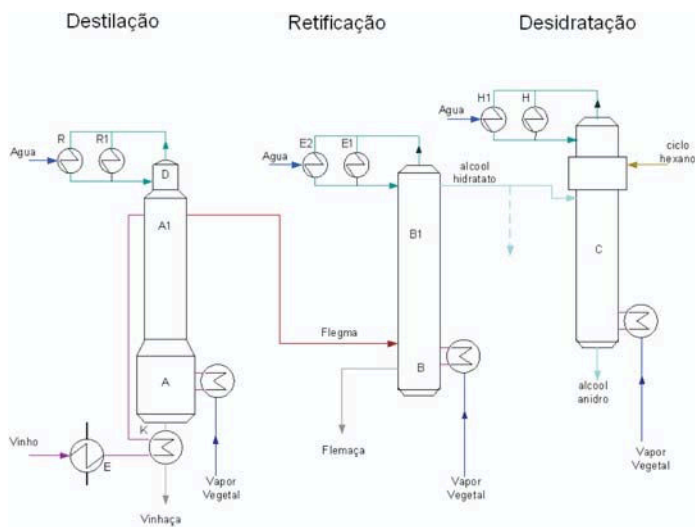
A seguir, o processo de destilação é discutido em maiores detalhes, por ser o processo escolhido neste projeto, para ser modelado e controlado utilizando técnicas avançadas de controle.

### **Processo de destilação**

A destilação consiste na separação dos componentes de uma mistura de fluidos, baseada na diferença das temperaturas de ebulição de seus componentes individuais (Henley e Seader, 1981). A operação adequada deste processo é fundamental para a qualidade dos produtos obtidos.

Os aparelhos de destilação em usinas de álcool têm a configuração básica como apresentado na Figura 1. A entrada do sistema é o vinho proveniente do processo antecedente - a fermentação - e a sua composição é: álcool (7 a 10 °GL), água (aproximadamente 90%) e demais componentes encontrados em quantidades bem menores tais como: glicerina, ácidos succínico e acético, leveduras e bactérias, sais minerais, etc.

Para a obtenção do álcool hidratado, conforme apresentado na Figura 1 tem-se duas principais operações; destilação propriamente dita (coluna A) e a retificação (coluna B). Para a obtenção do álcool anidro, deve-se realizar as duas operações anteriores seguidas da etapa de desidratação.



**Figura 1** - Processo simplificado de destilação de álcool

Para adquirir melhor eficiência energética e facilitar o processo de destilação, o vinho inicialmente, passa pelo condensador instalado no topo da coluna B (também chamado de retificadora) e segue para um trocador de calor situado no pé da coluna A (também chamado de esgotamento), onde é pré-aquecido por meio da vazão de saída da vinhaça. O vinho ao entrar na primeira coluna vai descendo e esgotando-se de álcool com cerca de 50 °GL, quando então é chamado de flegma, deixando esta coluna para ser encaminhado para a coluna B devido à diferença de pressão entre elas. O esgotamento continua até que o produto de fundo da coluna, chamado de vinhaça, for retirado com teor alcoólico máximo de 0,03 °GL.

O flegma, ao entrar na coluna B, vai se desalcoolizando até a saída do produto de fundo chamado flegmaça. O álcool hidratado, com teor máximo de 97,2 °GL é retirado no topo desta coluna e tem dois destinos: a estocagem e a coluna de desidratação, também chamada de coluna C.

A função da coluna C é obter o álcool anidro (99,7 °GL). Para tanto é necessária a utilização de um desidratante, devido ao fato de que o álcool hidratado constitui uma mistura azeotrópica (uma mistura de líquidos que se comportam como uma substância pura quanto ao ponto de ebulição, pois apresenta ponto de ebulição constante).

Do processo de destilação em Usinas de Álcool, existem três sub-produtos obtidos na forma de resíduos do processo: a vinhaça, a flegmaça e o álcool fúsel.

### Sistemas de controle no processo de destilação de álcool

A destilação consiste na separação dos

componentes de uma mistura de fluidos e é baseada na diferença das temperaturas de ebulição de seus componentes individuais. A operação adequada deste processo é fundamental para a qualidade dos produtos obtidos.

As colunas de destilação são equipamentos de separação mais empregados na indústria química, petroquímica e agroindustrial. Porém, apesar de sua larga utilização, é pequena a atenção dispensada ao sistema de controle. Isto não deveria ocorrer, pois, na maioria das industriais de transformação, mais de 75% do custo operacional energético é devido a essa operação unitária. Além de ser o equipamento que impede o aumento da produção (gargalo). Uma das formas de melhorar o desempenho tanto produtiva como energético passa pelo aperfeiçoamento do sistema de controle.

Se a estrutura de controle (pares PV-MV) de uma coluna de destilação não está definida corretamente ou se a sintonia dos controladores não está bem feita, o consumo de energia na entrada de vapor, nos condensadores e nas vazões internas de líquidos na coluna pode estar acima do necessário, ou seja, com custo operacional elevado e com a carga operacional reduzida. Isso significa, portanto, alto custo operacional com baixa produção. A melhoria do sistema de controle proporcionará uma minimização dos custos e maximização da produção nos aparelhos de destilação.

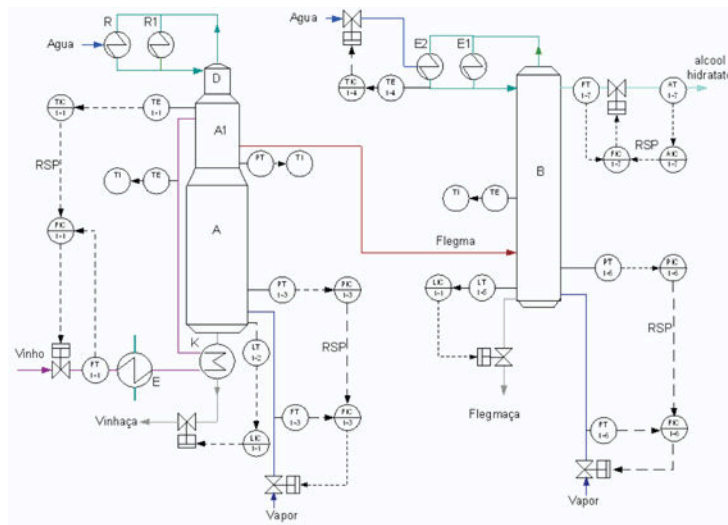
### Automação nos aparelhos de destilação

A automação atualmente utilizada em destilarias de álcool envolve o controle de 2 pontos principais de controle operacional: pressão na base das colunas e temperatura no topo das colunas. A automação envolve também o controle escravo de alimentação do vinho, álcool hidratado, desidratante e o controle de nível pela retirada de vinhaça, flegmaça e, álcool anidro. A indicação da temperatura em múltiplos pontos completa a instrumentação do processo.

Recentemente, algumas usinas têm controlado diretamente a concentração na saída da coluna B ao invés de inferir-la por intermédio da temperatura em um dos pratos da coluna B. Isso é devido à diminuição gradativa do preço deste tipo de sensor.

O diagrama de tubulação e instrumentação de um aparelho de destilação de álcool hidratado, também conhecido como diagrama P&ID (*piping and instrumentation diagram*) é apresentado na figura 2. Este figura apresenta a interconexão dos equipamentos e a instrumentação utilizada para controlar um aparelho

de destilação, seguindo a norma ISA 5S.1 para padronizar as simbologias e terminologias.



**Figura 2** - Diagrama P&ID de um aparelho de destilação de álcool hidratado

### Pressão nas colunas

O controle de temperatura do líquido na base das colunas é realizado pela energia transferida do vapor nos trocadores de calor. A quantidade de energia fornecida ao líquido na base da coluna, depende da produção de álcool pela destilaria. O controle de pressão é mais adequado, pois, a variação da temperatura na base da coluna é pequena e o sinal de pressão tem melhor resolução na medida. A pressão da coluna A deve ser maior que a pressão da B que, por sua vez, maior que a C. Isso porque a vazão de uma coluna para outra é realizada justamente por esta diferença de pressão existente entre as colunas.

O controle de pressão deve ser realizado preferencialmente em cascata com o controle de vazão de vapor vegetal, desta forma, não se espera a variação da pressão de líquido da coluna devido aos distúrbios de vazão que o vapor vegetal possa apresentar no processo.

Uma configuração de controle PID em cascata é utilizada, onde se recebe os sinais de pressão da coluna e de vazão de vapor para atuar na válvula de vapor e assim, manter o *setpoint* de pressão ajustado. Este controle é realizado para cada uma das colunas de forma independente.

### Temperatura no topo das colunas

O controle da temperatura no topo das colunas é realizado pela automação da degasagem dos

condensadores. O vapor do topo da coluna é condensado e retorna ao topo no estado líquido com temperatura reduzida e controlada. No caso da coluna A, o controle da temperatura no topo da coluna é realizado em cascata pela alimentação do vinho.

A temperatura na bandeja A16 é mantida pela quantidade de vinho adicionado e pela degasagem nos condensadores R e R1. O vinho é pré-aquecido no trocador de calor K, aproveitando assim o calor da vinhaça retirada da coluna A.

O controle de temperatura em cascata com o controle de vazão de vinho é necessário, pois, a alimentação do vinho está na interface com o processo de fermentação. Além disso, esta estratégia auxilia na ação de controle, pois tradicionalmente malhas de temperaturas são excessivamente lentas.

A degasagem nos condensadores E1 e E2 da coluna B deve ser automatizada (temperatura do refluxo), sendo lido pelo controlador a temperatura logo após a passagem pelos condensadores, calculado um sinal correspondente de vazão de água de resfriamento. De forma análoga as degasagens são automatizadas nos condensadores da coluna C.

### Nível das colunas

O controle de nível das colunas é realizado pela retirada de líquido. O controle PID é implementado na válvula de retirada das colunas A e B. O controle PID de nível, em cascata com a vazão de álcool anidro é sugerido para a coluna C.

O controlador recebe o sinal de nível de líquido na coluna A e atua na válvula de retirada de vinhaça para manter o nível ajustado no *setpoint*. Analogamente, um outro controlador atua na válvula de retirada de flegma para manter o nível da coluna B.

A retirada de álcool anidro da coluna C é controlada pela medição de um sinal de nível do líquido e vazão de álcool da coluna C. É realizado então o controle PID em função do *setpoint* local de nível e calculado um sinal correspondente à vazão de saída de álcool, que, internamente, é o *setpoint* do controle PID escravo de vazão. O sinal de vazão é lido pelo controlador que então atua na válvula de retirada de álcool anidro.

### Retirada de álcool hidratado

O controle da retirada de álcool hidratado pelo topo da coluna B é realizado normalmente em função da

temperatura da bandeja B4. O teor alcoólico do álcool hidratado retirado da coluna B está relacionado com a temperatura de B4 pela curva de fase e concentração da mistura água-álcool em função da temperatura. O controle sugerido da temperatura de B4 é realizado em cascata com o controle de vazão do álcool hidratado.

### **Revisão bibliográfica em controle de processos de destilação**

A destilação em Usinas de Álcool é um processo essencialmente multivariável e com restrições de operação. O comportamento do sistema é extremamente não linear e com um elevado grau de acoplamento entre as variáveis, associado às constantes de tempo elevadas e à presença de atraso na resposta, o que gera transientes elevados quando o processo é perturbado.

Apesar de as alternativas, como as alterações na configuração física convencional das colunas, apresentarem-se promissoras para a minimização dos transientes da planta, a solução mais abordada ainda é a implementação de técnicas avançadas de controle (ODLOAK, 1996; GEORGIU et al., 1998; Safavi et al., 1999; ABAU-JEYAB et al., 2001; ALPBAS et al., 2002; GUEDES, 2002; MIRANDA, 2005;).

Colunas de destilação necessitam de sistemas de controle capazes de rejeitar flutuações que ocorrem com frequência, mesmo quando o processo opera em regime permanente. O processo de separação permite a implementação de técnicas convencionais à aplicação de algoritmos avançados.

O controle de uma unidade de destilação deve atender a três necessidades básicas: manter o balanço de massa, atingir a qualidade desejada e às restrições do processo. No primeiro aspecto, busca-se manter os níveis na base e no acumulador, de maneira que não ocorra nem a inundação nem o esvaziamento da coluna. No controle de qualidade espera-se garantir a qualidade dos produtos, através de uma ou mais composições. Restrições impõem limitações em virtude da dinâmica do processo, como o uso de temperatura, vazões e pressões.

O principal objetivo da destilação é separar um dado volume de uma mistura em produtos mais valiosos. O valor dos produtos depende exclusivamente da qualidade. Por isto este é o ponto mais estudado na operação de uma coluna de destilação. Porém, o processo também deve ser rentável e o controle adequado à operação. Dessa maneira, a proposta principal de um sistema de controle é a minimização dos efeitos das variações não controladas e restabelecer a

qualidade a um ponto desejado (SEBORG et al. 1989).

Para a definição de um sistema de controle adequado é necessário conhecer a dinâmica do processo. O primeiro passo consiste em estudar quais variáveis do processo deseja-se manter em um ponto de operação (*setpoint*) constante e quais podem ser ajustadas dentro de uma faixa. Além disso, é necessário identificar quais variáveis atuam como perturbações no processo (BUCKEY et al., 1985; SKOGESTAD, 1992; REMBERG et al. 1994).

Sistemas de controle de colunas de destilação devem operar sob condições múltiplas e o ajuste destes torna-se um desafio. A formação de transientes existe mesmo quando controladores estão bem ajustados, pois é uma característica intrínseca ao processo.

Em relação à aplicação de controladores PID, a maior dificuldade reside no ajuste dos seus parâmetros. Desta forma, as propostas atuais concentram-se em novas formas de ajustes mais flexíveis e adequadas às características do processo em questão. Alvarez et al. (2000) e Pedret et al. (2002) apresentam novas configurações de um controlador PID, tais como auto-ajustável ou baseado em observadores de estado. Estudos com ajuste pelo método de síntese direta com a incorporação do tempo morto (INGIMUNDARSON e HAGGLUND, 2001) e técnicas de ajuste no domínio da frequência (CHANG et al., 2002) são outras abordagens. Técnicas que combinam a praticidade do PID com a flexibilidade do sistema multivariável (ZHENG et al., 2002) e com controle não linear (VESTER et al., 1992; Safavi et al., 1999) como exemplos de técnicas híbridas estudadas.

A abordagem baseada em Lógica Difusa (Fuzzy) consiste em uma alternativa interessante, uma vez que o objetivo desta técnica de controle é simular um operador, sendo capaz de controlar um processo através da tradução de regras (LU et al. 2001). Alguns estudos utilizam lógica difusa com controladores preditivos (MAHFUF et al. 2002) ou com compensação de tempo morto (ZHAO et al. 2002).

O controle preditivo é uma técnica muito utilizada, pois permite que haja maior flexibilidade no controle de mudanças de carga em colunas de destilação. Os estudos apresentados nesta área consistem em modificações para o controle preditivo linear como sugerido por Doma et al., (1996) e Trentacapilli (1997). Também é importante citar a aplicação de controladores preditivos baseados em modelo (MPC), muito aplicados em colunas de destilação devido à sua facilidade de implementação com restrições de processo (ABOU-JEYAB et al., 2001). Alguns estudos enfocando o problema de transição em

colunas de destilação são apresentados através de técnicas preditivas por matriz dinâmica (DMC) bem como controle preditivo generalizado (GPC). Georgiou et al. (1998), aplicam uma transformação logarítmica nas composições de topo e de fundo e o controle por matriz dinâmica não linear denominado de NLDMC (“*Nonlinear Dynamic Matrix Control*”) é implementado.

A técnica de controle MPC é uma estratégia de controle multivariável bastante difundida na indústria de processos. O MPC, basicamente utiliza um modelo dinâmico do processo para prever o seu comportamento futuro. Esta previsão é atualizada, ou corrigida, a cada iteração, com a medição das variáveis do processo. As ações de controle são calculadas de modo a minimizar a diferença entre a previsão e a trajetória de referência. Uma vantagem significativa desta técnica é a incorporação de restrições de desigualdade, tanto para as variáveis controladas quanto para as manipuladas (GUEDES, 2002).

Entretanto, a utilização de um modelo linear na síntese do controlador não é suficiente para garantir um bom desempenho do controle para processos não lineares. Isto devido a não consideração de certos comportamentos dinâmicos no modelo, ou mesmo variações nos parâmetros em diferentes condições operacionais.

### **Revisão bibliográfica em Identificação e Modelagem**

O desenvolvimento de modelos matemáticos para sistemas reais é tópico central em muitas disciplinas para as engenharias e outras áreas da ciência. Modelos são usados para simulações e análise do comportamento de sistemas no entendimento de mecanismos, no projeto e desenvolvimento de processos ou para o projeto de controladores. A modelagem de um processo industrial é, tradicionalmente, a junção do entendimento completo da natureza e comportamento fenomenológico de um sistema com um tratamento matemático apropriado, aliada à representação do sistema real. Esse tipo de abordagem é usualmente denominada “modelagem caixa-branca”.

Tem-se conhecimento que um completo e adequado entendimento fenomenológico de um sistema e de suas variáveis não é uma tarefa trivial para a grande maioria dos sistemas reais. Entretanto, é possível, com certo grau de abstração que a modelagem de alguns sistemas físicos seja factível, tendo em vista, por exemplo, os fatores esforço computacional e tempo despendido

para a modelagem dos sistemas reais. Assim, se o modelo da estrutura do sistema estudado é paramétrico e o principal problema é obter com certa exatidão valores para alguns parâmetros remanescentes, é possível lançar mão de algumas técnicas conhecidas de identificação. Nessas técnicas, os parâmetros remanescentes são identificados utilizando-se como informação e base de dados, respostas mensuradas a partir do sistema real investigado. Tais respostas podem ser obtidas por meio de sensores e a partir de entradas testes (*ad hoc*) conhecidas. (OGATA, 1997).

Os métodos de identificação têm sido correntemente estudados e desenvolvidos para se estimar parâmetros de diversos sistemas e a importância desses métodos é apresentada por muitos autores, podendo-se citar Haykin (1996, 1999).

Uma abordagem diferente na modelagem de processos industriais assume que os mesmos podem ser aproximados pelo uso de uma estrutura que utiliza funções gerais para a aproximação do seu comportamento. Esse modelo é comumente chamado de modelo “caixa-preta”. Um exemplo deste tipo de enfoque de aproximação são as Redes Neurais Artificiais (RNAs), utilizadas na identificação de sistemas dinâmicos. Uma vantagem dessa abordagem é a captura da dinâmica e das não-linearidades do sistema sob estudo. Uma outra significativa vantagem é que sua estrutura aceita como entrada, na maioria das vezes, os dados do processo sem a necessidade de pré-tratamento. Esse tipo de abordagem não requer um conhecimento específico e prévio do sistema estudado, porém apresenta a inconveniência de não explicar a casualidade fenomenológica entre as entradas da rede neural e as previsões das variáveis de estado geradas por esta. Apesar disso, o modelo caixa-preta é extensivamente utilizado na representação do comportamento e na análise de sistemas complexos.

Dentro dessa faixa de modelagem que se estende dos modelos “caixas-brancas” aos modelos “caixas-pretas” há os modelos “caixas-cinza”, também chamados de modelos híbridos - que pretendem combinar as vantagens dessas técnicas de modelagem estruturalmente bem diferentes. A literatura técnico-científica é rica em exemplos de identificação de modelos híbridos, (HAYKIN 1996; SAFAVI et al.1999; GILLBERT e LJUNG 2004). Nesse tipo de estrutura, o modelo requer um bom conhecimento físico por parte do engenheiro, além de uma boa experiência no assunto, mesmo que essa experiência seja um conhecimento empírico acerca do mesmo sem muita propriedade matemática. A identificação desse tipo de estrutura geralmente emprega

métodos de otimização não-linear, (RAO 1996): Simplex, Levenberg-Marquardt, Quasi-Newton e Algoritmos Genéticos (ALBUQUERQUE et. al., 2007).

Normalmente, um projeto de Controle Baseado em Modelo (MPC) tem aproximadamente 75% dos seus recursos gastos no trabalho de identificação (RIVERA, 2003). Mesmo com todo o esforço e custo empregados, se o procedimento não for adequando à situação, o modelo pode ser ineficaz para uma aplicação de MPC, isso porque, mesmo que o modelo seja bem representativo, o sistema sofre degradação com o tempo.

A identificação *online* é um tema que se tem desenvolvido nos últimos anos, embora a idéia original venha dos anos 60. Controladores robustos suportam modelos com um determinado desvio do processo real, mas mesmo nestes casos a degradação dos modelos pode se tornar grande demais. Por outro lado, um MPC funciona tão melhor quanto o modelo estiver mais próximo da planta e para isso é desejável que o processo de reidentificação seja realizado de tempos em tempos. A identificação *online* pode resolver esta questão (MIRANDA, 2005).

### Analizando o controle de um aparelho de destilação

A automação industrial em geral, visa principalmente, a produtividade, qualidade e segurança dos processos. Em um sistema típico todos os dados gerados pelos sensores são concentrados em controladores programáveis, os quais, de acordo com o algoritmo em memória definem o estado dos atuadores. Atualmente, com o advento de instrumentação de campo inteligente, funções executados nos controladores programáveis tem uma tendência de serem migradas para estes instrumentos de campo.

Uma contribuição adicional importante dos sistemas de automação industrial é a conexão do sistema de supervisão (Figura 3) e controle com sistemas corporativos de administração das empresas. Esta conectividade permite o compartilhamento de dados importantes da operação diária dos processos, contribuindo para uma maior agilidade e confiabilidade do processo decisório da empresa.

Utilizando a conexão do sistema de supervisão com sistemas corporativos de uma usina que se obteve acesso a um conjunto de dados históricos de variáveis do processo de um aparelho de destilação de álcool.

### Analises de produção e qualidade do produto

Baseado em um histórico de um período de

12/06/2007 até 24/06/2007, a vazão de entrada de vinho é apresentada na Figura 4.

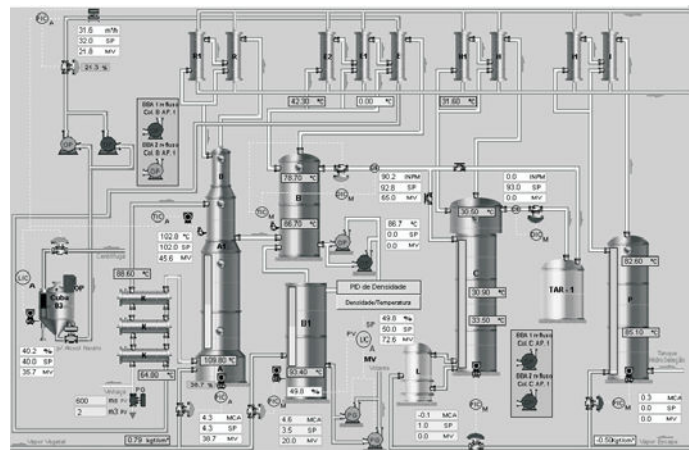


Figura 3 - Sistema de supervisão de um aparelho de destilação de álcool

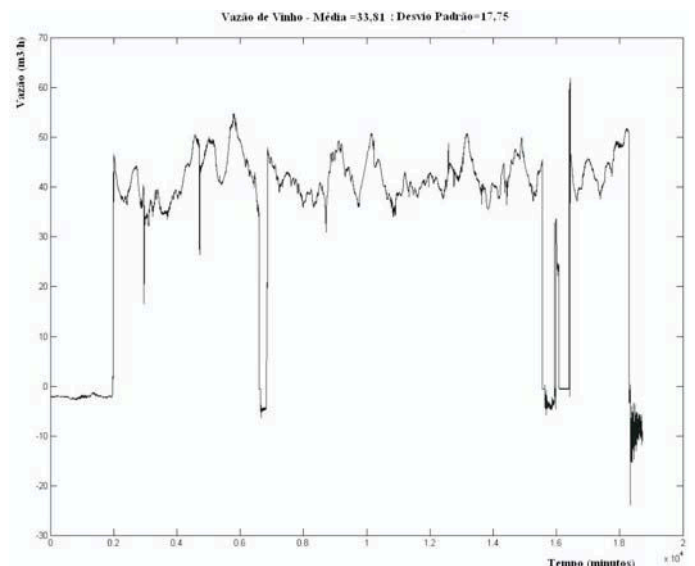
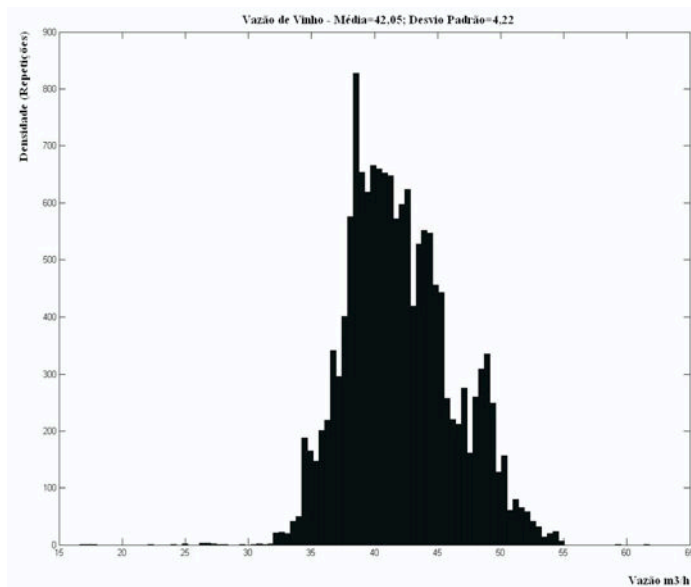


Figura 4 - Gráfico da vazão de vinho na entrada do aparelho no tempo

Analizando este gráfico, observa-se que em muitos momentos ocorrem quedas significativas de vazão, tipicamente causadas por falta de matéria prima (cana-de-açúcar). Neste histórico completo, a média de vazão de entrada de vinho no aparelho foi de 33,81 m<sup>3</sup>/h com desvio padrão de 17,75 m<sup>3</sup>/h.

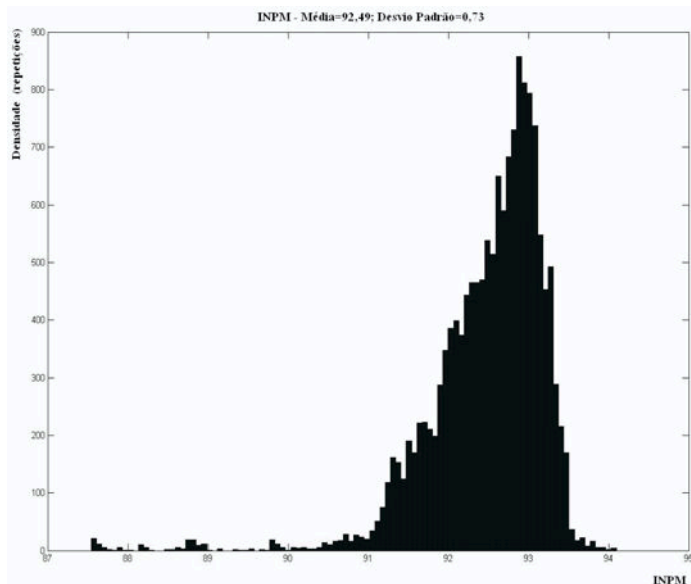
Como a falta de matéria prima é uma anomalia no processo - que ocorre no decorrer de uma safra devido a períodos chuvosos e problemas de logística - é importante analisar o processo sem a existência desta anomalia, ou seja, em condições normais de operação. Para tanto, é apresentado um histograma (Figura 5) desta nova condição.



**Figura 5** - Histograma da vazão de vinho desconsiderando as paradas no aparelho

Nesta segunda condição, a média de vazão de entrada de vinho no aparelho foi de 42,05 m<sup>3</sup>/h com desvio padrão de 4,22 m<sup>3</sup>/h.

Ainda desprezando as paradas nos aparelhos (quedas de vazão) é apresentado na Figura 6, o histograma da qualidade do produto final (álcool hidratado) medida em percentual de álcool (em peso) de uma mistura (INPM).



**Figura 6** - Histograma da qualidade do produto final medida em percentual de álcool (em peso) de uma mistura (INPM)

A medida da qualidade do produto final (álcool hidratado) foi de 92,49 INPM com desvio padrão de 0,73 INPM. Considerando que o valor de referência é de 92,2 INPM, verifica-se que a oscilação da qualidade do produto, dado pelo seu desvio padrão, não é aceitável, pois o desvio padrão deveria ser, para o

mesmo o valor de média, na pior das hipóteses de 0,29 INPM para garantir a qualidade requerida do produto.

## Conclusões

Apesar da tecnologia atual no processo de destilação apresentar uma eficiência na extração de álcool superior a 99%, a energia necessária para a produção poderia ser melhor aproveitada, pois a variável de produção apresentada pela vazão de entrada de vinho na coluna possui alta variabilidade (acima de 10%) mesmo em condições normais de operação, denotando uma ineficiência no controle de operação do processo, acarretando um gasto desnecessário de energia (retificação do álcool) para realizar o trabalho.

Além do fator energético, outro fator de desempenho que ainda pode ser melhorado é o relativo à produtividade. Isso porque, em muitos momentos de uma safra de cana-de-açúcar, o “gargalo” deixa de ser a matéria prima passando a ser os aparelhos de destilação. Desta forma, há a necessidade de uma tecnologia de controle que permita que o processo opere em uma condição de máxima economia de energia em determinadas situações (escassez de matéria prima, por exemplo) ou na condição de produção máxima para situações de excesso de material a ser destilado, ou seja, otimizando o processo.

Neste artigo não foram investigadas as causas das oscilações no processo, ficando como sugestão para trabalhos futuros, pois é de extrema importância quantificar as influências dos distúrbios nas variáveis do processo. Desta forma é desejável que se faça um projeto de experimentos no qual cada variável manipulada deve ser alterada ordenadamente para se verificar o impacto nas variáveis de processo por análises de variâncias.

## Referências Bibliográficas

- ABAU-JEYAB, R. A.; GUPTA, Y.P.; GERVAIS, J. R.; BRANCHI, P.A.; WOO, S.S. (2001). Constrained multivariable control of a distillation column using a simplified model predictive control algorithm. *Journal of Process Control*, v.11, p.509-517.
- ALPBAZ, M.; KARACAN, S.; CABBAR, Y.; HAPOGLU, H. (2002). Application of model predictive control and dynamic analysis to a pilot distillation column and experimental investigation. *Chemical Engineering Journal*, v.88, p.1-3
- ALBUQUERQUE, A. R. L.; Policastro, C.A.; PEDRO, L.M; CAURIN, G. A. P. (2007). The Dynamic Coupling Identification between the Artificial Robot Hand and the



- Actuators using Genetic Algorithm. In: XII DINAME - The International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics.
- ALVAREZ, R. J; MONROY, R.L.; CERVANTES, I.; MORALES, A. novel proporcional-integral-derivative control configuration with application to the control of batch distillation. *Industrial Engineering Chemical Research*, v.39, n.2, p.432-440, 2000.
- BUCKEY, P.S.; SHUNTA, J.P.; J.P.; LUYBEN, W.L. *Design of Destillation Calumn Control System*. Edward Arnold, New York, 1985.
- CHANG, W-D.; HWANG, R-C; HSIEH, J-G. A self-tuning PID control for a class of nonlinear systems based on the Lyapunov approach. *Jornal*, v.12, p.233-242, 2002.
- DOMA, M. J.; TAYLOR, P.A.; VERMEER, P.J. (1996). Closed loop identification of MPC models for MIMO processes using genetic algorithms and dithering one variable a time: application to an industrial distillation tower. *Computers & Chemical Engineering*, v.20, s.1, p. s1035-s1040.
- GEORGIU, A.; GEORGAKIS, C.; LUYBEN, W. (1998). Nonlinear dynamic matrix control for high-purity distillation. *AIChE Journal*, v.33, n.8, p.1287-1298.
- GUEDES, L.R.S (2002). *Controle Robusto de Coluna de Destilação de Alta Pureza*. Dissertação (Mestrado). p.103. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- HAYKIN, S. (1996). *Adaptive Filter Theory*; Third Edition; Prentice Hall.
- HAYKIN, S. (1999): *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice Hall.
- HENLEY, E. J.; SEADER, J.D. (1981). *Equilibrium-Stage Separation Operation in Chemical Engineering*. John Wiley & Sons, Canada.
- HUGOT, E.(1997). *Manual de Engenharia Açucareira*. Editora Mestre Jou; Primeira Edição na Língua Portuguesa; São Paulo.
- INGIMUNDARSON, A.; HAGGLUND, T. (2001). Robust tuning procedures of a dead-time compensating controllers. *Control Engineering Practice*, v.9, p. 1195-1208.
- LU, J.; CHEN, G; YING, H. (2001). Predictive fuzzy PID control; theory design and simulation. *Information Sciences*, v.137, p. 157-187.
- MAHFOUF. M.; KANDIAH, S.; LINKENS, D. A. (2002). Fuzzy model. Based predictive control using an ARX structure with feedforward. *Fuzzy sets and Systems*, V. 125, p.39-59.
- MIRANDA, F.C.P.R (2005). *Identificação de Sistemas em Malha Fechada usando Controle Preditivo Multivariável: um Caso Industrial*. 99.f Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MIRANGONI, C. (2005). *Implementação de uma Estratégia de Controle com Ação Distribuída em uma Coluna de Destilação*. 134 f. Tese Doutorado). - Universidade Federal de Santa Catarina.
- ODLOAK, d.(1996). a new state.space approach to model predictive control, *Braz. Jour. Chem. Engeng*, v.13, n3,p.152-167.
- OGATA, K. (1997). *Modern Control Engineering*. Third Edition; Prentice Hall.
- POLICASTRO, C. A. (2004). *Estratégias de Adaptação de Casos para Sistemas de Raciocínio Baseado em Casos*. Dissertação (Mestrado). Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação. Universidade de São Paulo.
- PEDRET, C.; VILANOVA, R.; MORENO, R. SERRA, I. (2002). A refinement procedure for PID controller tuning. *Computers & Chemical Engineering*., v.26, p. 903-908.
- RAO, S. S. (1996). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Third Edition, John Wiley & Sons.
- REMBERG, C.; INTEMANN, K.; FETT, F.N.; WOZNY, G. (1994). Decision supporting system for the design of control systems for distillation columns. *Computer & Chemical Engineering*, v.18, s.1, p. s409-413.
- RIVERA, D. E.; LEE, H.; BRAUN, M.W.; MITTELMANN, H. D. (2003). Plant-friendly system identification: a challenge for the process industries. Preprints 13<sup>th</sup> IFAC Symposium on System Identification. Rotterdam, p.917-922.
- SAFAVI, A. A., NOORAI, A. , ROMAGNOLI, J. A. (1999). A hybrid model formulation for a distillation column and the on-line optimisation study. *Journal of Process Control*, 9, pp 125-134.
- SEBORG, D.E.; EDGAR, T.F., MELLICHAMP, D.A.(1989). *Process Dynamics and Control*., John Wiley & Sons, Singapore, 717p.
- SKOGESTAD, S. (1992). Dynamics and Control Distillation Columns - A Critical Survey. Third IFAC Symposium on Dynamics and Control of Chemical Reactor, Distillation Columns and Batch Process, MC, p.1-25.
- TRENTACAPILLI, m. *et al.* (2002). High purity distillation control: some issues regarding the application of multivariable control. *Proceeding of the 1997 Symposiums on Distillation and Absorption*, v. 1, n.142, p.313-322.
- VESTER, M.T.; van der linden, r. j. p.; pangels, j. l. a. (1992) control design for an indutrial high-purity distillation column using mechanistic modeling and process identification. *Computers & Chemical*, v.16, s.1, p. s189-s196.
- ZHAO, F.; TIAN, Y.; TADÉ, M. O.; LI, H. (2002). A time-delay compensation strategy for process with uncertainties. *Computers & Chemical Engineering*. v.26, n.10, p..1835-1846.
- ZHEN LI KYTE, M. JOHNSON, B. (2004). Hardware-in-the-loop real-time simulation interface software design. In: *Intelligent Transportation Systems, 2004. Proceedings. The 7th International IEEE Conference*. p. 1012 - 1017.

Recebido em 17 de julho de 2007 e aprovado em 23 de julho de 2007.