

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

GUSTAVO HENRIQUE ROSSATTO

Estudo da variabilidade na operação de destilação de uma usina de álcool

Uberlândia

2023

GUSTAVO HENRIQUE ROSSATTO

Estudo da variabilidade na operação de destilação de uma usina de álcool

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel, em Engenharia Química.

Área de concentração: NUCOP/FEQUI

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R827 2023	Rossatto, Gustavo Henrique, 1996- Estudo da variabilidade na operação de destilação de uma usina de álcool [recurso eletrônico] / Gustavo Henrique Rossatto. - 2023. Orientador: Rubens Gedraite. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Química. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. 1. Engenharia química. I. Gedraite, Rubens, 1958- (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Química. III. Título. CDU: 66.0
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

GUSTAVO HENRIQUE ROSSATTO

Estudo da variabilidade na operação de destilação de uma usina de álcool

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Área de concentração: NUCOP/FEQUI

Uberlândia, 06 de fevereiro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rubens Gedraite – FEQUI/UFU

Eng. Mestre Wagner Vicente Pereira Junior – Cia. Mineira de Açúcar e Álcool

Eng. Mestre Vinícius Pimenta Barbosa – Doutorando PPGEQ/UFU

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo
estímulo, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor e amigo Rubens Gedraite por todo o incentivo, disponibilidade e orientação nesta caminhada acadêmica; agradeço aos meus pais, pelo apoio dado ao longo de todo curso; aos bons amigos que conheci na graduação, com quem tive o prazer de partilhar anos da minha vida e à minha companheira Júlia Rios pela motivação na reta final da graduação.

“Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa.”

(FREIRE, 2002, p. 69)

RESUMO

Usinas de álcool são montadas em localizações estratégicas com a finalidade de regular o fluxo entre oferta e demanda. Tratando-se da produção do álcool etílico, a manutenção da sua correta especificação técnica é primordial para evitar perdas com o reprocessamento do produto. A concentração do álcool produzido, quando não adequadamente controlada, pode propiciar perda econômicas significativas, devido principalmente ao custo associado à operação unitária da destilação. Nesse sentido, este trabalho estudou o comportamento das principais variáveis de processo associadas com o funcionamento de coluna de destilação tipicamente empregada em destilarias de usinas de álcool. Foram empregados os conceitos estudados na área de conhecimento de Controle Estatístico de Processo, visando identificar o comportamento das variáveis ao longo de 11 dias de operação típica. Concluiu-se que o comportamento das variáveis de processo foi coerente com o esperado e apresentou tendência de centralização no que tange ao emprego das cartas de controle. Complementarmente, a pureza do álcool etílico produzido foi mantida praticamente constante.

Palavras-chave: álcool etílico; destilação; controle estatístico de processo.

ABSTRACT

Alcohol plants are set up in strategic locations in order to regulate the flow between supply and demand. In the case of the production of ethyl alcohol, the maintenance of its correct technical specification is essential to avoid losses with the reprocessing of the product. The concentration of alcohol produced, when not properly controlled, can lead to significant economic losses, mainly due to the cost associated with the unit operation of distillation. In this sense, this work studied the behavior of the main process variables associated with the operation of a distillation column typically used in alcohol plant distilleries. The concepts studied in the area of Statistical Process Control were used, aiming to identify the behavior of the variables over 11 days of typical operation. It was concluded that the behavior of the process variables was consistent with expectations and showed a tendency towards centralization with regard to the use of control charts. In addition, the purity of the ethyl alcohol produced was kept practically constant..

Keywords: ethyl alcohol; distillation; statistical process control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	Fluxograma simplificado de um processo contínuo de fabricação de açúcar e álcool.....	20
Figura 2.2 -	Fluxograma de processo de uma destilaria típica.....	21
Figura 2.3 -	Bandejas e fluxo de líquido e vapor.....	22
Figura 2.4 -	Fluxograma de processo do conjunto de colunas “A”, “A1” e “D”.	26
Figura 2.5 -	Fluxograma de processo do conjunto de colunas B e B’.	27
Figura 2.6 -	Fluxograma de processo do conjunto de colunas “C” e “P”.	29
Figura 2.7 -	Exemplo de avaliação de desempenho de malha de controle.	32
Figura 2.8 -	Carta de controle típica	36
Figura 4.1 -	Carta de controle para a concentração alcóolica na saída da coluna B1	40
Figura 4.2 -	Carta de controle para a vazão de álcool na saída da coluna B1	41
Figura 4.3 -	Carta de controle para a temperatura do álcool na saída da coluna B1	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 -	Valores médios e variabilidade das variáveis de processo estudadas	41
Tabela 4.2 -	Tendência de comportamento do processo.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
IBGE	Instituto Brasileira de Geografia e Estatística
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
IAE	Integral Absolute Error
OEE	Overall Equipment Effectiveness
KPIs	Key Performance Indicators
TPM	Total Productive Maintenance
CEP	Controle Estatístico de Processo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Justificativa para a realização deste trabalho.....	12
1.2	Objetivos do estudo.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	O processo de fabricação do álcool etílico	13
2.2	A operação unitária destilação na fabricação do álcool etílico.....	21
2.3	Considerações sobre a variabilidade em processos industriais.....	30
2.4	Considerações sobre o emprego de Controle Estatístico de Processo (CEP).....	33
2.4.1	Gráfico de Pareto.....	34
2.4.2	Histograma.....	34
2.4.3	Folhas de Verificação.....	34
2.4.4	Diagrama de fluxo.....	34
2.4.5	Diagrama de causa e efeito ou diagrama de espinha de peixe.....	34
2.4.6	Diagrama de dispersão.....	35
2.4.7	Série temporal.....	35
2.4.8	Carta de controle.....	35
2.4.9	Diário de bordo.....	35
3	ELABORAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLE.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5	CONCLUSÃO.....	40
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa para a realização deste trabalho

O estudo da variabilidade apresentada por algumas das variáveis de um processo tipicamente empregado na indústria é um tema atual e de significativa importância no cenário econômico mundial. A indústria química, ou aquela que envolve algum tipo de processamento químico, apresenta diversos cenários nos quais a variabilidade no comportamento de um dado processo está presente.

A diminuição da variabilidade apresentada por um dado processo tem impacto direto nos custos operacionais e na melhoria da qualidade do produto final obtido. Um exemplo deste fato é a produção de gasolinas de melhor qualidade, que permitem às empresas produtoras cobrar mais pelo produto e melhoram o desempenho dos motores a combustão interna.

Na região do triângulo mineiro existem diversas usinas produtoras de álcool etílico, sendo o processo empregado pela maioria delas um ótimo campo de estudos sobre o tema proposto neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

1.2 Objetivo do estudo

O objetivo deste TCC é realizar a análise de variabilidade de três variáveis de processo envolvidas na operação unitária de destilação. Para tanto serão analisados os comportamentos temporais da concentração INPM do álcool hidratado produzido, a temperatura de uma das bandejas da coluna de destilação e a vazão de álcool hidratado retirado da coluna de destilação em estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada a fundamentação sobre o processo de produção de álcool etílico e sobre o assunto, variabilidade em processos industriais, abordando a informação pertinente ao tema usada para situar o leitor(a) no desenvolvimento das análises.

2.1 O processo de fabricação do álcool etílico

É apresentada a seguir uma descrição resumida e um fluxograma do processo de produção de álcool retirado do site de relações com investidores da empresa COSAN. Todas as etapas numeradas se referem ao fluxograma apresentado na Figura 2.1.

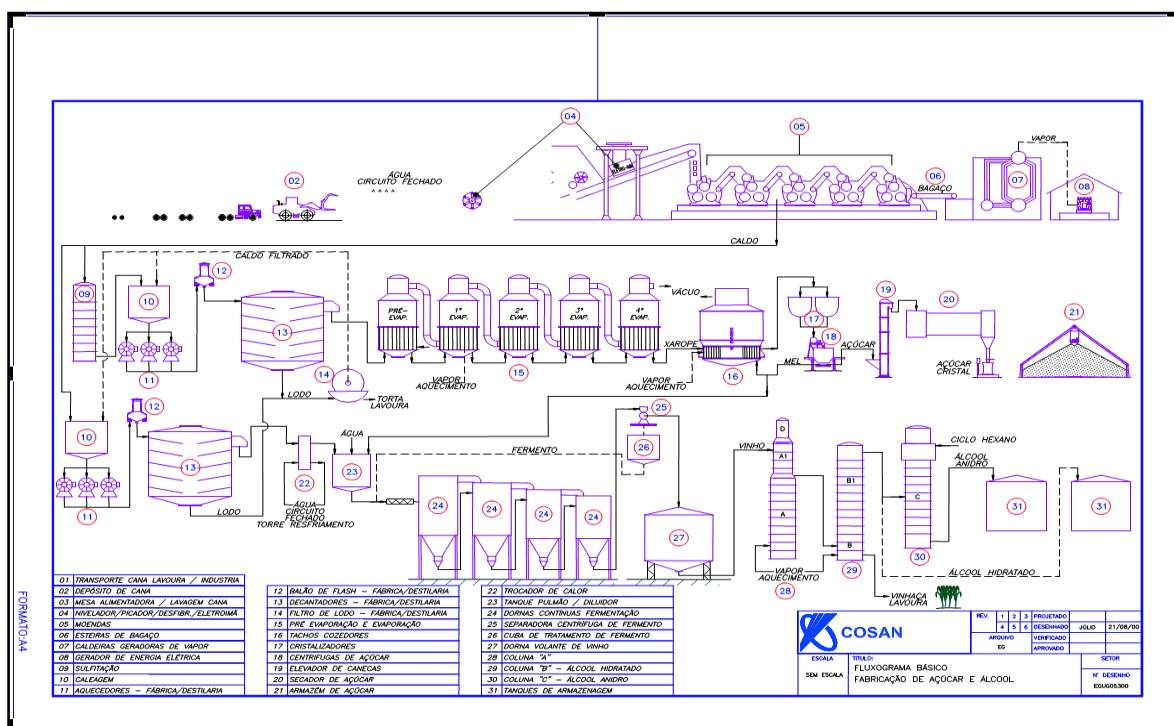


Figura 2.1: Fluxograma de um processo contínuo de fabricação de açúcar e álcool

Fonte: Cosan Açúcar e Álcool (2005)

A cana-de-açúcar é constituída basicamente de água (65 a 75%), sólidos (11 a 18%), fibras (8 a 14%) e pequenas quantidades de ácidos orgânicos e inorgânicos, proteínas, amido, ceras, graxas e corantes. Nos sólidos incluem-se: sacarose, glicose, frutose e sais. A produção do álcool geralmente é acoplada à produção do açúcar.

A colheita da cana pode ser feita manual ou mecanicamente. No primeiro caso, a cana é obtida inteira e no segundo caso, obtêm-se toletes de 20 a 25 cm. A cana é

transportada até as usinas por meio de caminhões dedicados a este fim. Estes são pesados antes e após o descarregamento para se obter a massa de cana recebida. O objetivo de se pesar a cana é permitir o controle agrícola, o controle da moagem e o cálculo de rendimento industrial. Além de pesada, a cana é também analisada para que se possa definir características como a quantidade de açúcares, de água e de fibra nela contida, a partir das quais o pagamento ao fornecedor da cana é efetuado.

O descarregamento da cana (ponto 02 da Figura 2.1) pode ser feito diretamente nas mesas alimentadoras da moenda através de guindastes do tipo hilo ou no pátio de estocagem para posterior alimentação no caso de falhas de transporte ou como “pulmão” para moagem no período noturno. A cana colhida mecanicamente não deve ser estocada, sendo assim alimentada de forma direta.

A cana descarregada nas mesas alimentadoras pode ser lavada ou não, dependendo da usina (ponto 03 da Figura 2.1). Esta lavagem tem o intuito de retirar parte de matérias estranhas, como terra e areia, de modo a obter um caldo de melhor qualidade e evitar o desgaste excessivo dos equipamentos. A cana colhida mecanicamente não é lavada, pois, devido a sua forma de toletes, o arraste de sacarose pela água seria muito grande.

Logo após a lavagem, a cana é conduzida através de esteira transportadora para um jogo de facas niveladoras, seguido do picador, do desfibrador e do eletroímã. Esta etapa é conhecida como preparo da cana (ponto 04 da Figura 2.1) e é controlada por sistemas automatizados microprocessados. O nivelador proporciona uma alimentação uniforme. O picador e o desfibrador têm como objetivo aumentar a densidade, aumentando a capacidade de moagem, e romper ao máximo as células para forçar uma maior eficiência de extração do açúcar. Já o eletroímã visa retirar possíveis materiais ferrosos que possam vir com a cana para evitar a quebra dos rolos das moendas.

Após a passagem pelo eletroímã, a cana é transportada por uma calha, o “shutdonnelly”, a qual é responsável pela alimentação da moenda, também é muito utilizado difusores que fazem a mesma função desse equipamento. Cada conjunto de moagem é composto por seis ou sete ternos de moenda. Cada terno possui de três a cinco rolos, por onde passa a cana desfibrada, separando o caldo do bagaço. Na prática, extrai-se 94 a 96% do caldo da cana, que é utilizado para produzir açúcar ou álcool.

Uma pequena quantidade de bagaço sai junto com o caldo. Este é retirado pela peneira “cush-cush” e devolvido à moenda. O bagaço resultante é levado por uma esteira até as caldeiras para a queima e a produção de vapor. Este conjunto de esteiras obedece à um comando central. O sistema de retenção de fuligem elimina a poluição do ar. A sobra de bagaço é enviada à um silo fechado ou ao depósito ao ar livre. O bagaço, quando não há moagem ou na entressafra, volta às caldeiras através de um conjunto de esteiras de retorno.

O produto que seria descartado na estapa de moagem pode ser reutilizado no processo, gerando energia para a usina, a produção de um bagaço final com baixa umidade para ser queimado nas caldeiras é de extrema importância.

O bagaço é conduzido, através de esteiras (ponto 06 da Figura 2.1), à caldeira (ponto 07 da Figura 2.1) onde é queimado para a produção de vapor d'água, com pressão média de 67 kgf/cm² e temperatura de 520°C. Este vapor é utilizado no acionamento de turbinas, transformando energia térmica em energia mecânica. Essas turbinas movimentam os picadores, os desfibradores, as moendas etc, bem como geradores de energia elétrica (ponto 08 da Figura 2.1), necessários em vários setores da usina. O vapor liberado nas turbinas, denominado vapor de escape, é um vapor de baixa pressão (1,5 kgf/cm²) e é utilizado como fonte básica de energia ao longo do processo de fabricação do açúcar e do álcool.

No intuito de diluir os sólidos remanescentes no bagaço para aumentar a extração, adiciona-se água ao bagaço antes de passar pelos últimos rolos, constituindo o processo denominado embebição. A embebição utilizada é do tipo composta, que consiste em adicionar água entre os últimos ternos e fazer retornar o caldo extraído deste último para o anterior e assim sucessivamente até o segundo terno (conjunto de três rolos da moenda).

O caldo resultante da extração pelas moendas passa por algumas etapas de tratamento antes de ser encaminhado à produção de açúcar e/ou álcool. Este caldo é peneirado, para remoção das impurezas mais grosseiras. No entanto, impurezas menores (solúveis, insolúveis ou coloidais) não são removidas apenas com a utilização de peneiras. No caso desse tipo de impurezas, uma sequência de procedimentos é adotada, no intuito de coagulá-las, de maneira que a decantação possa separá-las. Após essa sequência de

tratamento, descrita a seguir, o caldo é enviado à produção de açúcar e/ou álcool, sendo que, para o caso da produção de álcool, o procedimento de sulfitação não é necessário.

A sulfitação (ponto 09 da Figura 2.1) consiste na absorção de SO_2 pelo caldo, inibindo reações que causam a formação de cor, coagulando matérias coloidais, auxiliando na formação de precipitados que farão o arraste de impurezas durante a sedimentação, diminuindo a viscosidade do caldo e desinfetando o meio.

A calagem (ponto 10 da Figura 2.1) é feita através da adição de leite de cal, que é a solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que também ajuda na coagulação do material coloidal, auxilia na precipitação e arraste de impurezas solúveis/insolúveis e eleva o pH para valores mais próximos do pH neutro.

Na sequência, o caldo é então aquecido até aproximadamente 105°C (ponto 11 da Figura 2.1) para acelerar e facilitar as reações de coagulação e floculação dos colóides e não-açúcares protéicos e emulsificar graxas e ceras. O aquecimento nesta etapa do processo visa essencialmente aumentar a eficiência do processo de decantação e promover a posterior retirada de ar, também evitando a contaminação bacteriológica, a quebra de proteínas e a degradação de colóides.

No balão de flash (ponto 12 da Figura 2.1), ocorre o flasehamento, que consiste em uma diminuição brusca de pressão a qual provoca uma ebulição espontânea do caldo, eliminando assim o ar nele dissolvido que, quando presente, dificulta a decantação das impurezas mais leves.

A decantação (ponto 13 da Figura 2.1), também chamada de clarificação, é a etapa de purificação do caldo pela remoção das impurezas floculadas nos tratamentos anteriores. O caldo, livre das impurezas, é chamado caldo decantado e segue para a etapa de evaporação. As impurezas constituem o que é chamado de lodo.

O lodo é enviado à etapa de filtração, para recuperar o açúcar nele contido (ponto 14 da Figura 2.1). Dessa forma separa-se o caldo filtrado do material que fica retido no filtro, denominado de torta. Ela é formada basicamente pelos resíduos retirados na decantação. O caldo retorna ao processo e a torta é utilizada como adubo na lavoura.

A próxima etapa na sequência do processo é a fabricação do mel. O primeiro estágio deste processo é a concentração do caldo proveniente da etapa de tratamento. O caldo clarificado contém cerca de 85% de água. A evaporação (ponto 15 da Figura 2.1) tem como objetivo reduzir essa porcentagem para aproximadamente 40%. O caldo concentrado é chamado de xarope. Esta evaporação é feita em evaporadores de múltiplo efeito concorrente, isto é, o vapor gerado pela evaporação da água do caldo (vapor vegetal) presente na caixa de evaporação anterior é utilizado como fonte de aquecimento para a caixa posterior.

Saindo da etapa de evaporação, o xarope é enviado ao cozimento (ponto 16 da Figura 2.1) que é uma nova etapa de concentração, agora com a formação de cristais em virtude da precipitação da sacarose dissolvida na água. Os cozedores são equipamentos semelhantes aos evaporadores e seu produto final, cristais de açúcar envolvidos em mel (solução açucarada), é chamado de massa cozida. Nessa etapa atinge-se uma concentração entre 90 e 95 °Brix (porcentagem em peso de sólidos) à temperatura entre 58 a 65°C.

A massa cozida é então enviada para cristalização, realizada em cristalizadores (ponto 17 da Figura 2.1) os quais a resfriam lentamente com o emprego de água. Dessa maneira, consegue-se recuperar parte da sacarose que ainda estava contida no mel por sua deposição nos cristais já existentes gerando o consequente aumento dos mesmos.

Dos cristalizadores, a massa cozida é submetida à operação de centrifugação, realizada em centrífugas (ponto 18 da Figura 2.1). A força centrífuga promove a separação do açúcar. O mel removido é coletado e retorna aos cozedores para um maior esgotamento. O açúcar descarregado das centrífugas apresenta teor de umidade (0,5 a 2%) e temperatura elevada (65 a 95°C).

Seguindo, o açúcar é submetido ao processo de secagem. Os cristais de açúcar são transportados por um elevador de canecas (ponto 19 da Figura 2.1), até os secadores (ponto 20 da Figura 2.1) do tipo tambores rotativos, levemente inclinados em relação ao plano horizontal, e usando ar quente em contracorrente com o açúcar a ser seco. Este açúcar pode ser comercializado desta forma como açúcar VHP, ou então, utilizado para a fabricação de outros produtos como o açúcar invertido, o açúcar refinado ou o açúcar líquido. A armazenagem do açúcar pode ser feita em sacaria ou a granel (ponto 21 da Figura 2.1).

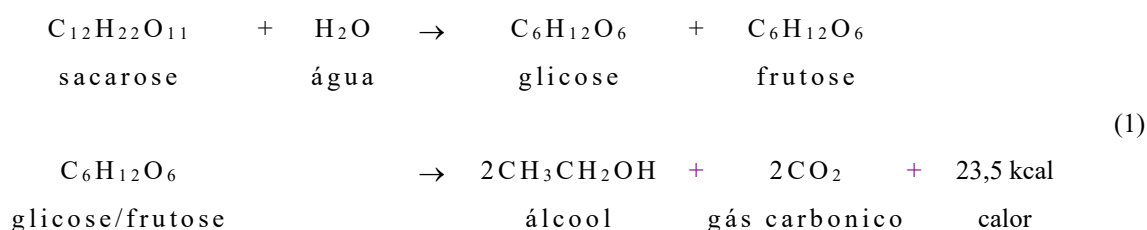
A próxima etapa consiste no resfriamento do caldo. Ao contrário do que ocorre na fabricação do açúcar, o caldo que servirá como matéria-prima na produção de álcool deve ser resfriado. É comum fazer com que o caldo quente troque calor com o caldo frio, sendo este aquecido e aquele resfriado. Não sendo suficiente, o caldo que é enviado para a destilaria deve escoar através de um trocador de calor (ponto 22 da Figura 2.1) ou mais trocadores de calor, nos quais haverá trocas de calor com água fria até atingir a temperatura de aproximadamente 30°C.

A próxima etapa é a fermentação. Ela tem início com o preparo do mosto, o qual é uma solução de açúcar cuja concentração foi ajustada de maneira a tornar a fermentação mais eficiente. O mosto é preparado a partir do mel, caldo e água (ponto 23 da Figura 2.1) de modo que a mistura apresente uma concentração final por volta de 16 a 23°Brix.

Após a preparação do mosto, é realizado o preparo do fermento, sendo este tipicamente empregado no processo de fermentação “Melle-Boinot” em destilarias. Esse processo tem como principal característica a recuperação de leveduras através da centrifugação do vinho (ponto 25 da Figura 2.1).

De modo a propiciar condições ótimas de fermentação e evitar a infecção bacteriana, a levedura recuperada sofre um tratamento antes de retornar ao processo (ponto 26 da Figura 2.1). Este tratamento consiste da adição de água, reduzindo o teor alcoólico e de ácido sulfúrico até pH = 2,5, gerando uma mistura conhecida como “pé-de-cuba”.

A fermentação ocorre em tanques denominados dornas de fermentação (ponto 24 da Figura 2.1) onde o mosto é misturado com o “pé-de-cuba” na proporção de 2:1, respectivamente. Os açúcares (sacarose, glicose e frutose) são transformados em álcool segundo a reação de Gay-Lussac, conforme mostrado na Equação 1.



Como mostrado nas reações apresentadas na Equação (1), a fermentação libera gás carbônico e calor. O gás é lavado de modo a recuperar o álcool evaporado que é arrastado pelo CO₂. Devido ao calor liberado, normalmente é utilizado nas usinas um sistema de resfriamento, a fim de manter a temperatura de 32°C.

Após um período de 4 a 12 horas, a fermentação termina gerando um produto final de teor alcoólico entre 7 e 12%, denominado vinho fermentado. Na sequência é realizada a centrifugação do vinho: Das dornas de fermentação, o vinho é centrifugado (ponto 25 da Figura 2.1) de modo a separar o fermento. Este fermento recuperado é denominado “leite de levedura” e retorna às cubas de tratamento. O vinho de-levedurado é enviado à dorna volante (ponto 27 da Figura 2.1) e posteriormente às colunas de destilação.

A próxima etapa do processo é a operação de destilação. O vinho proveniente da fermentação é composto basicamente por componentes em fase líquida, dentre os quais se destacam o álcool (7 a 10°GL) e a água (89 a 93%). Os demais componentes como glicerina, álcoois homólogos superiores, furfural, aldeído acético, ácidos succínico e acético, bagacilho, leveduras e bactérias, açúcares infermentescíveis, sais minerais, matérias albuminóides, CO₂ e SO₂ são encontrados em quantidades bem menores.

Para a separação do álcool, utiliza-se o processo de destilação no qual os diferentes pontos de ebulição dos componentes da mistura são responsáveis pela separação. A operação é realizada em três etapas: destilação propriamente dita, retificação e desidratação. Em todas elas o aquecimento é feito a partir do vapor, de forma direta ou indireta.

Na destilação (ponto 28 da Figura 2.1), o etanol é separado do vinho. O vinho, inicialmente com 7 a 10°GL é de composto em duas correntes: flegma (vapores com 40 a 50°GL) e vinhaça (que segue para a lavoura como fertilizante com menos de 0,03°GL). Essa etapa de destilação elimina ainda impurezas como aldeídos e ésteres.

A etapa de retificação (ponto 29 da Figura 2.1) visa concentrar o flegma proveniente da destilação de forma a obter um grau alcoólico de 96°GL à saída e retirar impurezas como álcoois homólogos superiores, aldeídos, ésteres, aminas, ácidos e bases.

O álcool pode, também, sofrer a operação de desidratação. O álcool a 96°GL é chamado álcool hidratado. Para a produção de álcool anidro, a 99,7°GL pode se utilizar ciclohexano como desidratante. Essa necessidade surge do fato de que o álcool hidratado constitui uma mistura azeotrópica. Uma mistura azeotrópica é uma mistura em que os componentes não são separados por um processo de destilação simples. A adição do ciclohexano forma uma mistura ternária com a água e o álcool cujo ponto de ebulição é menor do que o da mistura binária inicial. Após a separação (ponto 30 da Figura 2.1), o agente desidratante é recuperado e reaproveitado. Algumas Usinas utilizam um sistema conhecido como peneira molecular para fazer a desidratação.

Os alcoóis produzidos, hidratado e anidro, são quantificados e enviados a tanques de grande volume (ponto 31 da Figura 2.1) onde são estocados para posterior comercialização.

Na sequência é apresentada uma descrição da unidade de destilação empregada em usinas de álcool, considerando os principais equipamentos utilizados e as respectivas funções.

2.2 A operação unitária destilação na fabricação do álcool etílico

A destilação é um processo através do qual separam-se as substâncias de uma mistura líquida, mediante a evaporação dos elementos mais voláteis, isto é, obtendo duas ou mais frações diferentes. De acordo com a temperatura a que forem destiladas (segundo o seu grau de volatilidade), o produto de fundo será composto pelos componentes menos voláteis.

De modo geral, as unidades de destilação tipicamente existentes em usinas de produção de álcool hidratado e álcool anidro, provenientes da cana-de-açúcar, são compostas de uma série de equipamentos, tais como: colunas de destilação, condensadores, aquecedores, e resfriadores, como apresentado na Figura 2.2.

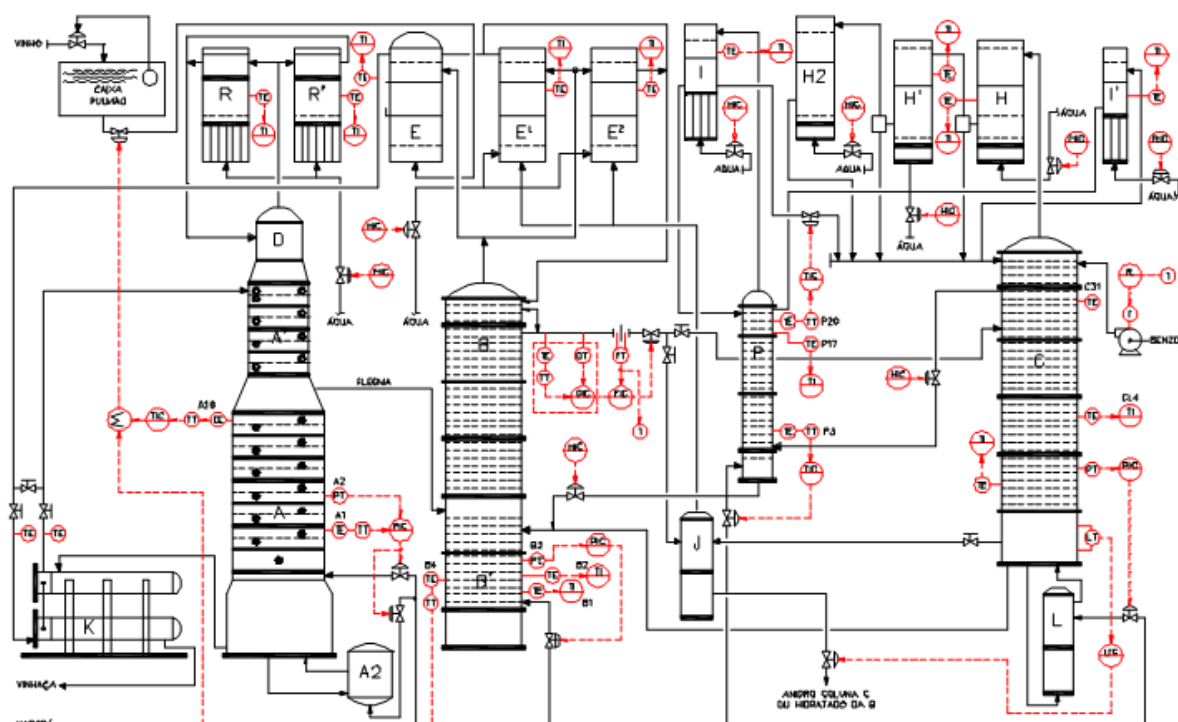


Figura 2.2: Fluxograma de processo de uma destilaria típica

Fonte: Barbosa (2013)

As colunas de destilação largamente utilizadas são providas de pratos ou bandejas, sendo que a quantidade destas depende do projeto, capacidade, aplicação e do fabricante da coluna. Na Figura 2.3 é ilustrado um arranjo típico destas bandejas. As bandejas estão equipadas com dispositivos chamados vertedouros ou *downcomers*, que servem para conduzir o fluxo de líquido do prato superior ao prato inferior, como ilustrado na Figura 2.3. Eles servem, também, para manter uma quantidade predeterminada de líquido sobre a bandeja, para que os vapores ascendentes possam borbulhar através do líquido contido em cada

bandeja, antes de chegar à bandeja superior. Outros dispositivos e formas construtivas das colunas podem ser empregados, de acordo com o projeto de cada fabricante.

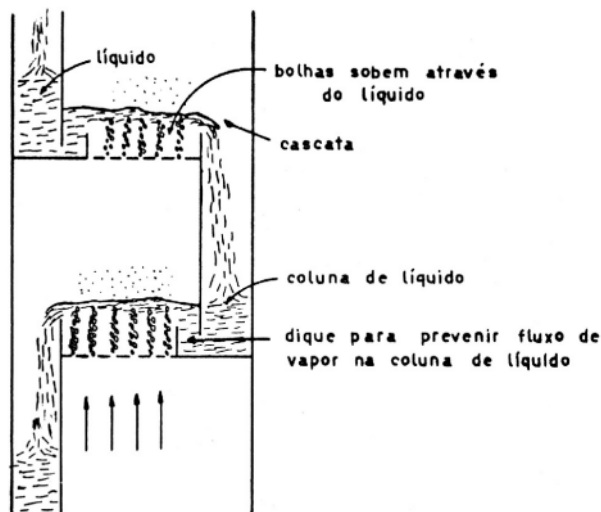


Figura 2.3: Bandejas e fluxo de líquido e vapor
Fonte: adaptado de Barbosa (2013)

Dentre as colunas empregadas no processo de fabricação do álcool hidratado e álcool anidro, pode-se destacar as seguintes:

- Coluna de esgotamento de vinho:

Também conhecida como “Coluna A”, tem a função de esgotar o álcool contido no vinho proveniente do processo de fermentação e gerar um vapor alcoólico, cuja concentração deve estar entre 40 e 50°GL, o qual sai pelo topo com o nome de flegma. Na base dessa coluna, o produto de fundo resultante é chamado de vinhaça, que é reaproveitado no plantio da cana-de-açúcar. Tem em torno de 20 bandejas, providas de borbulhadores e vertedores (para conduzir o fluxo de líquido), pelos quais passam a fase vapor e a fase líquida (vinho) respectivamente.

- Coluna de epuração de vinho:

Também conhecida como “Coluna A1”, normalmente localizada acima da “Coluna A”, tem a função de epurar o vinho, gerando um flegma rico em contaminantes, o qual será concentrado na coluna de concentração de cabeças (“Coluna D”). Tem em torno de 6 bandejas providas de borbulhadores e vertedores, pelos quais passam a fase vapor e a fase líquida (vinho) respectivamente.

- Coluna de concentração de cabeças:

Também conhecida como “Coluna D”, normalmente localizada acima da “Coluna A1”, tem a função de concentrar o flegma rico em contaminantes, oriundo da “Coluna A1”. Tem em torno de 8 bandejas providas de borbulhadores e vertedores, pelos quais passam a fase vapor e a fase líquida (álcool) respectivamente.

- Coluna de retificação:

Também conhecida como “Coluna B”, tem a função de concentrar o flegma oriundo da coluna de esgotamento de vinho (“Coluna A”), até 96° GL, o qual será extraído da bandeja de número 40 ou 42 o álcool hidratado carburante. Além disso, concentra os alcoóis superiores (óleo fúsel alto e baixo). Tem em torno de 50 bandejas providas de borbulhadores e vertedores, pelos quais passam a fase vapor e a fase líquida (álcool) respectivamente.

- Coluna de esgotamento de flegma:

Também conhecida como “Coluna B1”, normalmente localizada abaixo da “Coluna B”, tem a função de esgotar o álcool contido no flegma líquido, oriundo da coluna de retificação (“Coluna B”) e gerar um vapor alcoólico, o qual retorna para a coluna de retificação (“Coluna B”) para ser concentrado. Tem em torno de 16 bandejas providas de borbulhadores, por onde passa a fase vapor, e vertedores por onde passa a fase líquida.

- Coluna de desidratação:

Também conhecida como “Coluna C”, tem a função de desidratar o álcool hidratado, resultando no álcool anidro (com teor alcoólico de 99,9° GL), com o uso do ciclohexano e um decantador (câmara) no seu topo. Composta por aproximadamente 43 bandejas providas de borbulhadores, por onde passa a fase vapor, e vertedores por onde passa a fase líquida.

- Coluna de recuperação:

Também conhecida como “Coluna P”, tem a função de recuperar o ciclohexano misturado em álcool, proveniente da camada inferior do decantador da “Coluna C”, para retorná-lo ao processo. Composta por aproximadamente 20 bandejas providas de borbulhadores, por onde passa a fase vapor, e vertedores por onde passa a fase líquida.

Cada conjunto de colunas é provido de condensadores resfriados a água, podendo ser parciais ou totais. A função dos condensadores é condensar os vapores produzidos nos topos dos conjuntos de colunas, para que retornem ao processo. A distribuição desses condensadores se dá da seguinte forma:

- Conjunto de colunas “A”, “A1” e “D”:

Uso dos condensadores “R” e “R1”. O “condensador R” faz a condensação parcial de vapores alcoólicos provenientes da “Coluna D”, e o “condensador R1” a condensação de incondensáveis resultantes do “condensador R”, de forma a obter o álcool de 2^a.

- Conjunto de colunas “B” e “B1”:

Uso dos condensadores “E”, “E1” e “E2”. O “condensador E” faz um pré-aquecimento do vinho proveniente da fermentação utilizando vapores de álcool hidratado vindo da “Coluna B”. O “condensador E1” faz a condensação parcial de vapores de álcool provenientes do “condensador E”, e o “condensador E2” a condensação de vapores de álcool provenientes do “condensador E1”.

- “Coluna C”:

Uso dos condensadores “H” e “H1”. O “condensador H” faz a condensação de vapores de água, álcool e ciclohexano provenientes da “Coluna C”, e o “condensador H1” a condensação de vapores de álcool resultantes do “condensador H”.

- “Coluna P”:

Uso do condensador “I” que faz a condensação de vapores da mistura ternária provenientes da “Coluna P”.

O processo de produção de álcool hidratado basicamente se inicia com o vinho proveniente do processo de fermentação (processo não descrito neste trabalho) passando por um pré-aquecedor (também conhecido como “condensador E”), onde é aquecido até temperaturas em torno de 70°C, trocando calor com vapores alcoólicos provenientes do topo da “Coluna B”.

Em seguida, o vinho recebe um aquecimento final no aquecedor de vinho (também conhecido como “trocador de calor K”), atingindo a temperatura de 90 à 95°C, trocando calor

com a vinhaça proveniente da base da “Coluna A”. A vinhaça é reaproveitada no plantio da cana-de-açúcar.

Ao sair do “trocador de calor K”, o vinho é alimentado na “Coluna A1”, onde ocorre a liberação de impurezas voláteis e gases que estão dissolvidos no vinho, devido à menor volatilidade dessas substâncias (liberação devido ao aquecimento do vinho por vapor injetado na base da “Coluna A”). Os vapores produzidos nessa coluna são encaminhados para a “Coluna D”, onde atingem uma concentração de aproximadamente 88,38°INPM. Esses vapores seguem para os condensadores “R” e “R1”, onde se condensam e retornam para a “Coluna D”.

Especificamente no “condensador R” ocorre nos vapores o desprendimento de impurezas voláteis, inclusive CO₂ e SO₂. Esse desprendimento é feito por condensação fracionada, sendo que, por terem menor ponto de ebulição, os incondensáveis vão para o “condensador R1”, onde são condensados e extraídos como álcool de 2^a. Portanto, o produto resultante do “condensador R” é de melhor qualidade que aquele do “condensador R1” (menor quantidade de contaminantes).

Após ser epurado na “Coluna A1”, o vinho vai para a “Coluna A” onde ocorre o esgotamento do álcool. Nesse processo, vapores alcoólicos (chamado de flegma) são gerados e direcionados para a base da “Coluna B”, e a vinhaça, quase isenta de álcool desce para a base da “Coluna A”. O flegma é constituído essencialmente por água, álcool etílico, alcoóis superiores (N-propanol, N-butanol, isobutanol e amílicos) e pequenas quantidades de aldeídos e ésteres, tendo graduação alcoólica entre 40 e 50°GL. Na Figura 2.4 é apresentado o fluxograma de processo do conjunto de colunas “A”, “A1” e “D”.

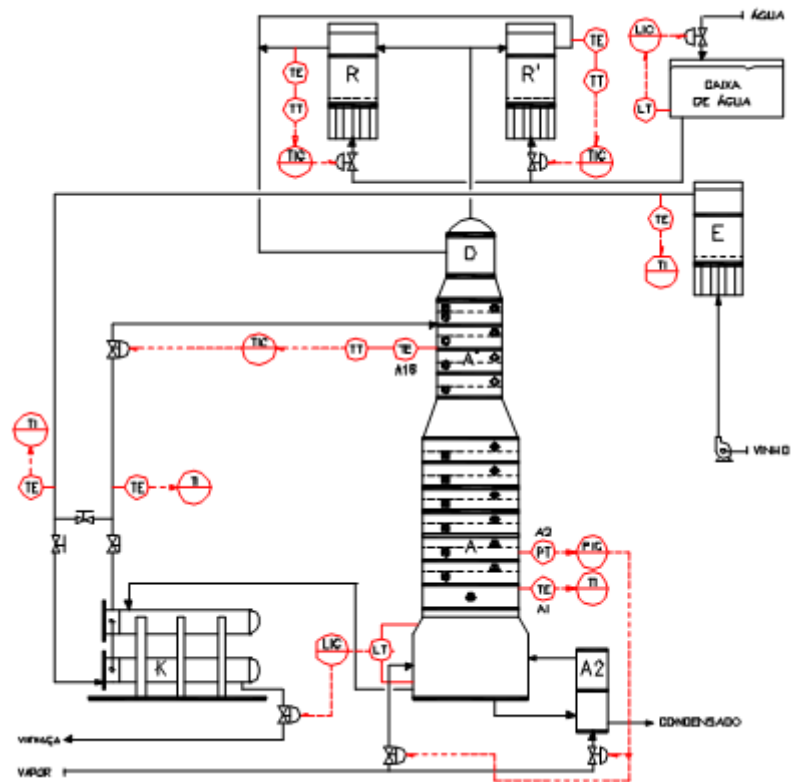


Figura 2.4: Fluxograma de processo do conjunto de colunas “A”, “A1” e “D”
 Fonte: Barbosa (2013)

A partir do vapor injetado na base da coluna de esgotamento de flegma (também conhecida como “Coluna B1”), que fica abaixo da “Coluna B”, o flegma vai se esgotando até gerar a flegmaça, isenta de álcool. A flegmaça desce até a base da “Coluna B1”, onde é retirada e utilizada em outras aplicações. O flegma, com o esgotamento, gera vapores de álcool de onde se extrai o álcool hidratado (entre 92,8 à 93,6°INPM, que corresponde a 95,26 à 95,82°GL à 20°C), que é levado para os tanques de armazenamento de álcool (após ser resfriado), para comercialização, ou para a produção de álcool anidro. Os vapores não alcoólicos produzidos são encaminhados para as bandejas superiores da “Coluna B” (zona de concentração de impurezas), e de lá seguem para os condensadores principal e auxiliar de retificação (também conhecidos por condensadores “E1” e “E2”, respectivamente) onde se condensam e retornam para a “Coluna B”.

Além da flegmaça extraída na base da “Coluna B1”, muitas vezes ocorre a formação de alcoóis superiores na parte inferior, sendo eles o óleo alto e o óleo baixo. O óleo alto é constituído basicamente pelos alcoóis n-propanol, n-butanol e iso-propanol, e a finalidade de

sua extração é para evitar perdas excessivas de álcool hidratado, sendo armazenado e/ou redestilado com o envio para a dorna volante junto com o vinho.

O óleo baixo é constituído basicamente de alcoóis amílico, butílico, isoamílico e iso-butílico, é insolúvel em água e se combina com o álcool hidratado, mas tendo ponto de ebulição em torno de 135°C, sendo que o do álcool hidratado se situa em torno de 78,4°C. Pela miscibilidade com o álcool hidratado o óleo baixo tenderia a subir na “Coluna B1”, mas devido ao seu elevado ponto de ebulição permanece nas regiões de maior temperatura da coluna (mais próximo da base). Dessa maneira, se acumula em uma região intermediária da “Coluna B1”, onde a concentração de álcool hidratado varia entre 40 e 70% em volume. O óleo baixo é encaminhado a um decantador, onde é resfriado (troca de calor com água), para extração do óleo fúsel. A solubilidade do óleo fúsel com água aumenta com a temperatura, por isso a necessidade de resfriar o óleo baixo para obter a melhor separação dos dois produtos. O óleo fúsel é comercializado, pois possui um excelente mercado na sua utilização. Na Figura 2.5 é apresentado o fluxograma de processo do conjunto de colunas “B” e “B1”.

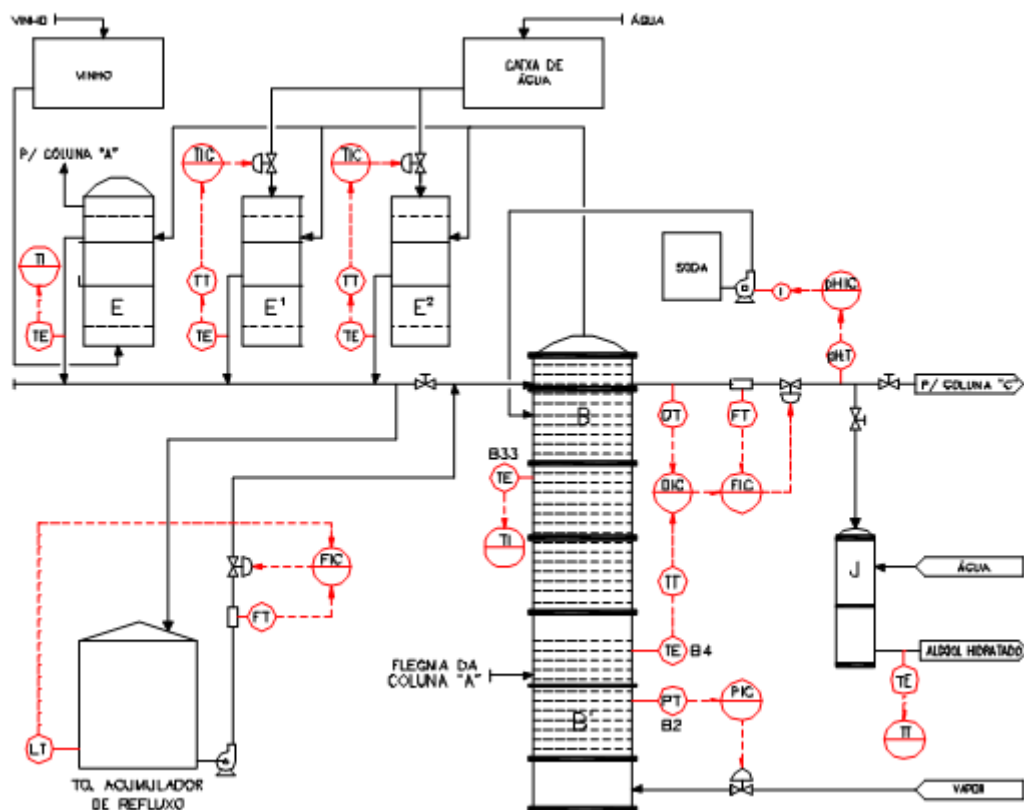


Figura 2.5: Fluxograma de processo do conjunto de colunas B e B'
 Fonte: Barbosa (2013)

O processo de produção de álcool anidro basicamente se dá com o álcool hidratado proveniente da “Coluna B” que vai para a coluna desidratadora (também conhecida como “Coluna C”). Além do álcool hidratado, a “Coluna C” recebe ciclohexano (agente desidratante), que tem a função de proporcionar a separação do álcool e da água, já que por destilação simples não é possível separá-los além da proporção de 95,57% de álcool e 4,43% de água. Com o álcool hidratado e o ciclohexano forma-se uma mistura azeotrópica ternária que possui ponto de ebulição menor do que o da mistura de água e álcool (em torno de 64,85°C).

A mistura azeotrópica ternária é aquecida pelo vapor injetado na base da “Coluna C”, sendo que na parte superior inicia-se a separação da água e do álcool através do ciclohexano, onde se tem um decantador que serve para a separação de fases. A camada superior, rica em ciclohexano, é recirculada ao processo, enquanto a camada inferior é retirada continuamente e enviada à coluna de recuperação (também conhecida como “Coluna P”).

Os vapores de água, álcool e ciclohexano que sobem ao longo da “Coluna C” atingem o topo e seguem ao condensador de desidratação principal (também conhecido por condensador “H”), onde trocam calor com água. Os vapores que acabam não sendo condensados no “condensador H” vão para o condensador-resfriador de desidratação (também conhecido por condensador “H1”). Os elementos condensados nos condensadores “H” e “H1” retornam para o topo da “Coluna C”.

A fase inferior do decantador no topo da “Coluna C” possui grande quantidade álcool e ciclohexano, não sendo ainda o álcool anidro, mas também não sendo descartado. Portanto, na “Coluna P” procede-se uma destilação simples desse composto (com aquecimento por vapor) para separação do álcool e do ciclohexano. O ciclohexano retorna para o processo, após passar pelo condensador de deciclohexanoagem (também conhecido por condensador “I”), e o álcool (já anidro) se junta ao da base da “Coluna C”.

Do processo na “Coluna C”, o álcool anidro desce até a base, de onde sai para ser resfriado, e depois armazenado em tanques para comercialização. Fluxograma de processo do conjunto de colunas “C” e “P” conforme apresentado na Figura 2.6.

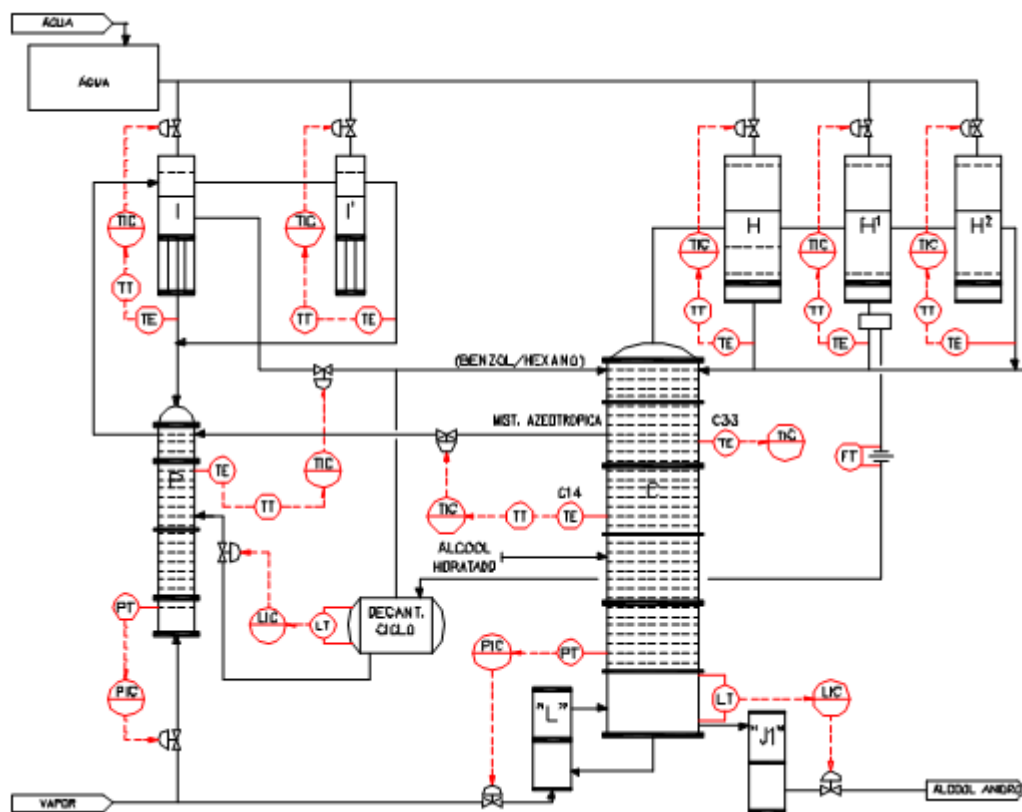


Figura 2.6: Fluxograma de processo do conjunto de colunas “C” e “P”
 Fonte: Barbosa (2013)

O processo de destilação ora descrito é a base da produção de álcool hidratado e álcool anidro, largamente utilizado na maioria das destilarias do Brasil. Porém, podem ocorrer variações de destilaria para destilaria, com processos um pouco diferentes do descrito.

A automação, instrumentação e tecnologia hoje utilizadas nas usinas de açúcar e álcool são bastante avançadas, contemplando o emprego de malhas de controle que foram largamente estudadas e testadas durante anos de pesquisa e experimentos. Porém, ainda assim, tem-se casos em que ainda não foi possível proporcionar um controle automático do processo sem intervenção de operadores, devido ao emprego de lógicas de controle mais complexas, sendo este um tema que merece estudos exploratórios adicionais.

A retirada do álcool hidratado da “Coluna B” é um controle que está nessa situação. É feita através do controle de uma válvula na saída de álcool hidratado, e cuja modulação depende de outras variáveis de processo que devem ser consideradas para o seu funcionamento adequado.

Na próxima seção é apresentada a fundamentação necessária para permitir o entendimento do tema relacionado à análise de variabilidade de variáveis de processo, tendo

em vista que este assunto está presente no dia-a-dia da operação de diversos processos industriais e que a sua mitigação contribui para aumentar a qualidade do produto final e a rentabilidade do processo.

2.3 Considerações sobre a variabilidade em processos industriais

Atualmente, o foco das análises dos processos produtivos é a melhoria da qualidade do produto final e o aumento de rentabilidade. No que tange ao aspecto da qualidade, pode-se afirmar que esta representa a adequação do produto ao uso para o qual este foi projetado. Neste cenário, são condições imprescindíveis a qualidade do projeto e a conformidade com as especificações de projeto (MONTGOMERY, 2000). Assim sendo, o processo produtivo pode ser entendido como sendo o responsável pela garantia desta última condição.

A variabilidade, presente na significativa maioria dos processos industriais, é o fator de maior peso na redução da qualidade dos produtos. Ela pode ser entendida como a dispersão do valor de uma variável do processo em torno do seu correspondente valor médio, que é usualmente o valor desejado para aquela variável. A variabilidade é uma condição indesejada que afeta diretamente os custos de produção e a qualidade do produto final a ser entregue ao cliente.

Dentre os fatores que podem causar variabilidade em um processo da indústria química, pode-se citar: (i)- a qualidade da matéria-prima empregada; (ii)- a má sintonia de uma malha de controle automático; (iii)- um equipamento de processo mal dimensionado e (iv)- operadores mal treinados para a função (VAN DEN BERG *et al.*, 2002).

Em malhas de controle, a variabilidade pode ser devida a diversos fatores, tais como: (i)- oscilações causadas por agarramento ou histerese em válvulas de controle; (ii)- pela má sintonia dos parâmetros do controlador; (iii)- por ruídos presentes no valor medido; (iii)- por perturbações indesejadas impostas ao processo e (iv)- por não linearidades presentes neste. Cumpre destacar que a mitigação da variabilidade em uma parte do processo é imprescindível para evitar a sua propagação para as etapas seguintes do mesmo.

Existem diversas maneiras de se medir a variabilidade apresentada por um processo. No caso específico das malhas de controle, caso o set-point seja constante, a variância ou o desvio padrão podem ser empregados como medida da dispersão do valor da variável controlada em torno do valor do set-point. A variabilidade pode, também, ser calculada como

a razão entre a variância e o valor médio da variável de processo sob controle (BRITTAIN, 2003). No caso do set-point ser variável, é recomendado medir a variabilidade apresentada pelo sinal de desvio (erro) do controlador ao invés da dispersão apresentada pela variável de processo medida, podendo-se utilizar índices de desempenho da malha de controle, tal como o IAE (Integral Absolute Error) ou o desvio padrão do sinal de erro (BRITTAIN, 2003).

Existem alguns métodos para se monitorar constantemente a variabilidade apresentada por uma malha de controle, podendo ser online ou offline. Dentre os métodos disponíveis na literatura, foram escolhidos quatro que são citados na sequência. O desempenho de malhas de controle é de fundamental importância para a manutenção do valor da variabilidade dos processos em níveis aceitáveis. Se as malhas funcionam bem, as chances de o processo se manter dentro das especificações requeridas são consideravelmente maiores.

O primeiro método é o de monitoramento contínuo de malhas de controle (SEBORG *et al.*, 1989). Ele permite identificar malhas de controle com desempenho aquém do desejado e que necessitam de auditoria e melhorias dos parâmetros de sintonia dos controladores. Já existem programas de avaliação de desempenho e auditoria de malhas de controle no mercado nacional, capazes de auxiliar na execução de tais tarefas. As malhas são avaliadas em conformidade com certos índices de desempenho escolhidos pelo usuário. Estes índices atribuem notas a cada malha e a cada área industrial, além de poder atribuir uma nota global para a unidade industrial como um todo. Como exemplo de índices, pode-se citar: o IAE; a amplitude das oscilações da malha; o tempo de permanência da malha em modo automático; o deslocamento da haste e o número de reversões de posição do atuador de uma válvula de controle; a saturação da variável de processo ou de saída do controlador dentre outros (GARIA, 2005). As malhas de controle são ordenadas de acordo com as notas ponderadas pela importância econômica correspondente a cada uma e exibidas na forma de um diagrama de Pareto, como mostrado a título de exemplo na Figura 2.7.

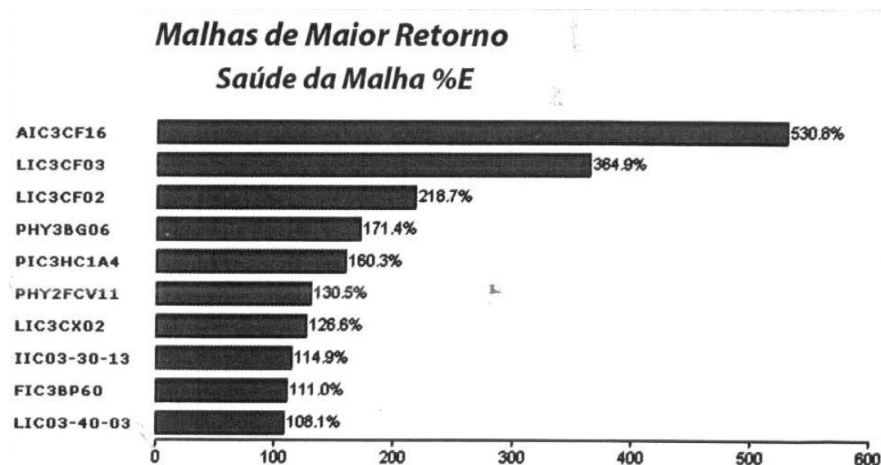


Figura 2.7: Exemplo de avaliação de desempenho de malha de controle
Fonte: Oliveira Junior *et al.* (s.d.)

O segundo método de monitoramento da variabilidade se baseia em indicadores de desempenho, popularmente conhecidos como OEE (Overall Equipment Effectiveness), que são indicadores de gerenciamento de ativos do processo que englobam outros indicadores, tais como: disponibilidade, desempenho e qualidade. Este indicador está alinhado com a filosofia TPM (Total Productive Maintenance) e depende do percentual de produto(s) produzido(s) com qualidade em relação à quantidade potencial, para a velocidade nominal especificada para o equipamento.

O monitoramento do OEE e a sua manutenção em valores elevados trazem diversos benefícios para o processo, tais como: a redução do tempo de parada de equipamentos; a diminuição dos custos de manutenção; o melhor gerenciamento do tempo de vida útil dos equipamentos; o aumento da produtividade; a identificação de gargalos no processo; o aumento da qualidade e a redução do desperdício. O OEE se constitui em uma métrica de manufatura que aumenta a visibilidade do desempenho do processo em relação ao estado das máquinas e equipamentos. A meta consiste em se alcançar um valor elevado de OEE, que varie pouco ao longo do tempo, aumentando a previsibilidade do processo.

De maneira análoga, existem *KPIs*, que podem ser traduzidos como indicadores chave de desempenho, específicos para cada classe de ativos (malhas de controle, instrumentos, redes etc.). Também pode-se utilizar como indicadores de desempenho a demanda por matéria-prima, por energia e por utilidades. Nestes casos, é esperado que estes indicadores apresentem a menor variabilidade possível, contribuindo para reduzir a variabilidade do *lead time* e tornando mais fácil cumprir os prazos de entrega dos produtos aos clientes.

Complementarmente, contribuem para diminuir a necessidade de manutenção de elevados estoques intermediários na planta, que causa impacto direto no custo do capital.

O terceiro método de monitoramento da variabilidade se baseia na metodologia Seis-Sigma (Six-Sigma) que é um método criado para gerenciar defeitos no produto final. Essencialmente, é uma metodologia utilizada para detectar e eliminar defeitos em qualquer processo, que funciona com base na definição de objetivos, na coleta de informações do processo e na análise dos resultados obtidos. A principal diferença em relação a métodos mais antigos de controle de qualidade reside no fato de que a metodologia Seis-Sigma é sensível às características dos processos e não aos produtos defeituosos (WHEELER, 2002).

A implicação deste fato é que cada característica que afeta a qualidade do produto é monitorada e cada situação fora de especificação – para uma determinada característica – é considerada um defeito. Assim sendo, um produto pode conter mais de um defeito ao passo que os métodos clássicos apenas consideram o fato de o produto ser apropriado ou não apropriado ao uso, independente do número de defeitos que ele apresenta. Essa abordagem torna o método Seis Sigma mais preciso.

2.4. Considerações sobre o emprego de Controle Estatístico de Processo (CEP)

O CEP é um método sistemático de análise de dados e uso de informações para resolver problemas e controlar operações. Ele pode ser empregado como um sistema de controle de qualidade, agindo como: (i)- um sistema de detecção, o qual atua sobre o resultado do processo ou (ii)- como um sistema de prevenção, atuando diretamente sobre o processo.

Quando se aborda o emprego do CEP, é importante ter em mente que existe a figura do custo da não qualidade, que afeta diretamente a rentabilidade do processo. Dentre os custos de não qualidade, pode-se citar: (i)- o custo de prevenção; (ii)- o custo de avaliação e (iii)- o custo de reparação, que envolve o custo de falhas internas e externas.

Outro conceito importante é o conceito de especificação, cuja definição pode ser expressada como sendo os requisitos pré-estabelecidos do produto que devem ser alcançados a fim de que o mesmo atenda às necessidades para as quais foi criado. Através das especificações é que se determina a qualidade do lote. Associado ao conceito em tela, está o conceito de tolerância, o qual pode ser definido como a faixa de variação admissível para uma dada propriedade.

O processo em estudo deve ser entendido como o sistema de trabalho adotado para se produzir determinado produto ou manter determinada condição dentro das especificações, sendo constituído de cinco fatores que influenciam no seu comportamento, a saber: (i)- mão-de-obra; (ii)- máquina; (iii)- métodos; (iv)- material e (v)- meio ambiente.

Outro aspecto relevante neste tema são as ferramentas básicas empregadas para a utilização de CEP que são brevemente descritas na sequência:

2.4.1 Gráfico de Pareto

É um gráfico de barras onde cada barra representa um dos problemas existentes. A altura de cada barra corresponde à incidência do problema que está sendo analisado e estes são ordenados de modo decrescente em relação as frequências de ocorrência.

Essa abordagem foi feita originalmente por J. M. Juran, que estabeleceu a “regra dos poucos vitais e dos muitos triviais”. Através de sua utilização decide-se onde concentrar os esforços de modo a se ter um melhor retorno.

2.4.2 Histograma

É um diagrama de barras de uma distribuição de frequências, que auxilia na visualização da distribuição da característica que está sendo estudada.

2.4.3 Folhas de verificação

São folhas para coleta de dados que ajudam a garantir a qualidade dos mesmos. As mais comuns são as folhas de verificação para distribuições do processo, para itens defeituosos, para localização de defeitos e para causa e efeito.

2.4.4 Diagrama de fluxo

É um diagrama que mostra em qual ordem ocorrem os passos ou atividades de um processo, facilitando a identificação dos pontos do processo onde o controle das atividades deve ser iniciado.

2.4.5 Diagrama de causa e efeito ou diagrama de espinha de peixe

É um diagrama que tem como objetivo, pesquisar as relações entre causas e efeitos que intervêm no processo. As causas ou os fatores são representados por setas que concorrem para o efeito que está sendo estudado. Geralmente os processos são analisados a partir de cinco grupos de fatores, a saber: máquina, método, material, mão-de-obra e ambiente.

2.4.6 Diagrama de dispersão

É um gráfico para duas características que ajuda a verificar a existência de relação causal e a determinar a importância e tendência desta relação.

2.4.7 Série Temporal

Antes de se estabelecer os limites de controle e de se calcular os índices é importante ter certeza de que o processo está estável. Quando as amostras forem retiradas sequencialmente, é necessário fazer um gráfico dos dados em função do tempo, isto é, em função da ordem em que esses dados foram coletados. Tendências e ciclos presentes no processo são facilmente detectados através do uso de tais gráficos.

2.4.8 Carta de controle:

É uma ferramenta utilizada para verificar o comportamento do processo durante a sua execução, a fim de se saber se o mesmo está ou não está sob controle. Esta ferramenta é constituída de uma folha onde na frente aparecem os gráficos de controle e no verso o diário de bordo. Para se controlar as variações do processo ao longo do tempo é conveniente retirar-se algumas amostras em intervalos regulares de tempo de modo que estas sejam representativas do lote produzido naquele intervalo de tempo. Os resultados da avaliação destas amostras devem ser registrados num gráfico cartesiano denominado carta de controle. Com base na utilização das cartas de controle pode-se detectar variações na centralização, na dispersão ou em ambas.

2.4.9 Diário de bordo:

O Diário de bordo é um complemento da carta de controle que traz em seu verso um espaço próprio para se registrar todas as mudanças ocorridas durante o processo. Este instrumento é de importância vital para a análise do comportamento do gráfico de controle, devendo ter em cada registro a data, a hora e o comentário explicando claramente todas as informações possíveis a respeito das mudanças ocorridas.

Outro conceito importante nesta área do conhecimento é o conceito de estabilidade. Diz-se que um processo está estável quando existe a repetibilidade de resultados. Só há sentido de se tentar controlar estatisticamente um processo estável.

Para que seja possível realizar um bom CEP, é fundamental que a coleta dos dados seja feita de maneira criteriosa. Para atender a este requisito, deve-se ser capaz de responder: (i)- que

dados devem ser coletados; (ii)- em que ponto do processo os dados devem ser coletados; e (iii)- como os dados serão coletados? (tempo, custo versus a precisão do processo de medida).

Para responder as perguntas formuladas no parágrafo anterior, deve-se: (i)- selecionar amostras no início do processo e conhecer as limitações do operador; (ii)- selecionar amostras separadamente para isolar as fontes de variação; (iii)- minimizar mudanças dentro das amostras e (iv)- decidir a frequência de amostragem, levando em conta quão crítica é a característica estudada, qual é o controle e a capacidade histórica do processo, o tipo do processo e o custo envolvido.

Neste TCC é dada ênfase ao emprego das cartas de controle, por ser a ferramenta utilizada para verificar o comportamento do processo durante a sua execução, a fim de se saber se o mesmo está ou não sob controle. Inicialmente era constituída por uma folha de papel, na qual se construíam os gráficos de controle na parte da frente e no verso das mesmas são feitas as anotações que comporão o diário de bordo.

Para se controlar as variações do processo ao longo do tempo, é conveniente retirar algumas amostras em intervalos regulares de tempo, de modo que estas sejam representativas do lote produzido naquele intervalo de tempo. Os resultados da avaliação das amostras devem ser registrados no gráfico cartesiano denominado carta de controle. Através das cartas de controle pode-se detectar as variações na centralização, na dispersão ou em ambas. Na Figura 2.8 é apresentada a representação típica de uma carta de controle.

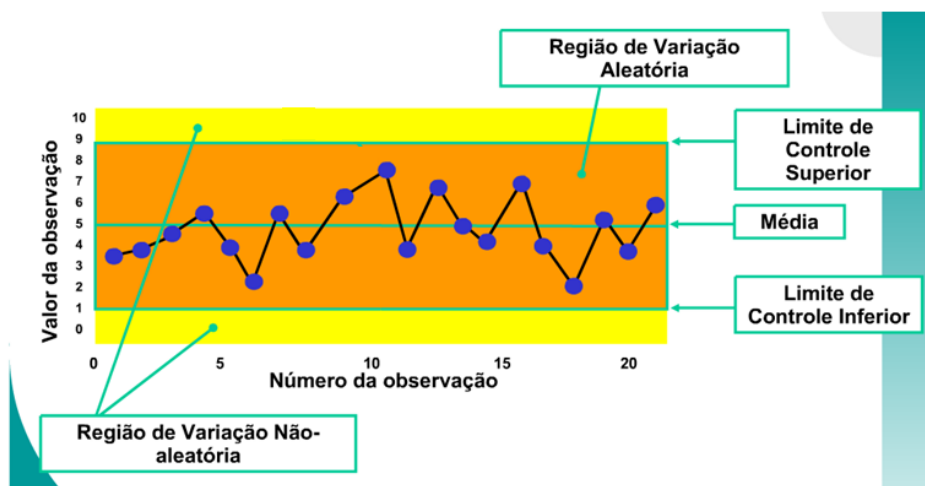


Figura 2.8 – Carta de controle típica
Fonte: adaptado de Barbosa (2013)

Quando são empregadas variáveis no controle estatístico de processo, são necessários dois gráficos, a saber: (i)- um para controlar a centralização do processo e (ii)- um para controlar a sua variabilidade (dispersão). Cada gráfico de controle tem uma finalidade bem específica e um não substitui o outro. Considerando o emprego de cartas de controle para média (\bar{X}) e amplitude (R), sabe-se que os limites para o controle da média são apresentados na Equação (2.1) e na Equação (2.2).

$$LSC_{\bar{X}} = \mu + 3 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.1)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \mu - 3 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.2)$$

3 ELABORAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLE

A elaboração das cartas de controle foi feita com base em informações disponíveis na literatura, para uma usina produtora de álcool localizada no interior do estado de São Paulo. Os valores apresentados no corpo do texto são aproximados e se prestam – em essência – a desenvolver a relação de causa e efeito entre as variáveis de processo envolvidas na operação de uma coluna de destilação identificada com as letras “B” e “B’” na Figura 2.5.

Importante destacar que os valores das medições utilizadas para a construção das cartas de controle foram previamente analisadas e filtradas de maneira a eliminar valores espúrios presentes nos dados coletados. Foi utilizado o filtro exponencial proposto por SEBORG *et al.* (1989). O valor adotado para a constante do filtro foi igual a 100, obtido pelo método da tentativa e erro, e escolhido por não distorcer os valores originalmente medidos ao longo do tempo, conservando a tendência de comportamento do processo.

Para o desenvolvimento da análise, algumas considerações foram importantes. O conhecimento dos pontos apresentados na sequência permitiu a análise mais adequada do modelo matemático usado para desenvolver o presente estudo (GARCIA, 2005; MELO e PINTO, 2008). A temperatura é uma variável de processo importante no controle da coluna de destilação “B”. O conhecimento do seu valor permite antecipar as variações na concentração do teor alcoólico da corrente de processo retirada da coluna. Contudo, o melhor é controlar a composição da corrente de topo retirada da coluna “B” com base na concentração do álcool etílico produzido, expresso em °INPM. (PEREIRA JR, 2022).

Se a corrente de saída apresentar um teor alcoólico muito elevado, muito provavelmente a temperatura da coluna estará com tendência de queda e a coluna tenderá a “afogar”. As variações que ocorrem na composição de saída da corrente de processo que interessa ao estudo (álcool retirado pelo topo da coluna “B”) se devem ao fato de que a concentração do vinho alimentado à coluna “A” é muito variável (LUYBEN, 1990).

Outro ponto que merece destaque é o fato de que se a temperatura de saída da corrente de topo tende a aumentar, a concentração alcoólica daquela corrente de processo tende a diminuir. Ademais, a concentração alcoólica da corrente de saída tende a variar mais lentamente do que a temperatura da coluna de destilação. Pereira Jr (2022) sugere que a constante de tempo procura representar a variação da concentração alcoólica em resposta a um fechamento brusco da válvula de controle de vazão de saída de álcool etílico é de

aproximadamente 5 minutos. Para a temperatura, o valor da constante de tempo é da ordem de 2,5 minutos. Outra informação que interessa no estudo realizado neste TCC é que quando a válvula de controle de vazão instalada na corrente de saída de álcool é completamente fechada, a coluna “afoga” em aproximadamente 10 minutos.

Se a temperatura no interior da coluna estiver muito elevada é igualmente ruim para a especificação do produto final (álcool etílico a 92,5°INPM), pois existe a tendência de arrastar o óleo fúsel para o topo da coluna o que é prejudicial, pois além de tirar o produto desejado da especificação, contribui para sujar o trocador de calor identificado como trocador “J”, que é um trocador de placas (PEREIRA JR, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As cartas de controle foram construídas considerando o intervalo de aproximadamente 11 dias de operação contínua de uma coluna de destilação do tipo B1 típica, durante 24 horas por dia. As variáveis de processo estudadas foram a temperatura, a vazão e a concentração alcoólica do etanol retirado no topo da referida coluna. Os valores das variáveis de processo utilizados nas cartas de controle foram medidos por meio de sensores devidamente calibrados e instalados na referida coluna. As cartas de controle estão apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.3 e na Tabela 4.1 são apresentados os valores médios das variáveis estudadas, seguido da respectiva variabilidade.

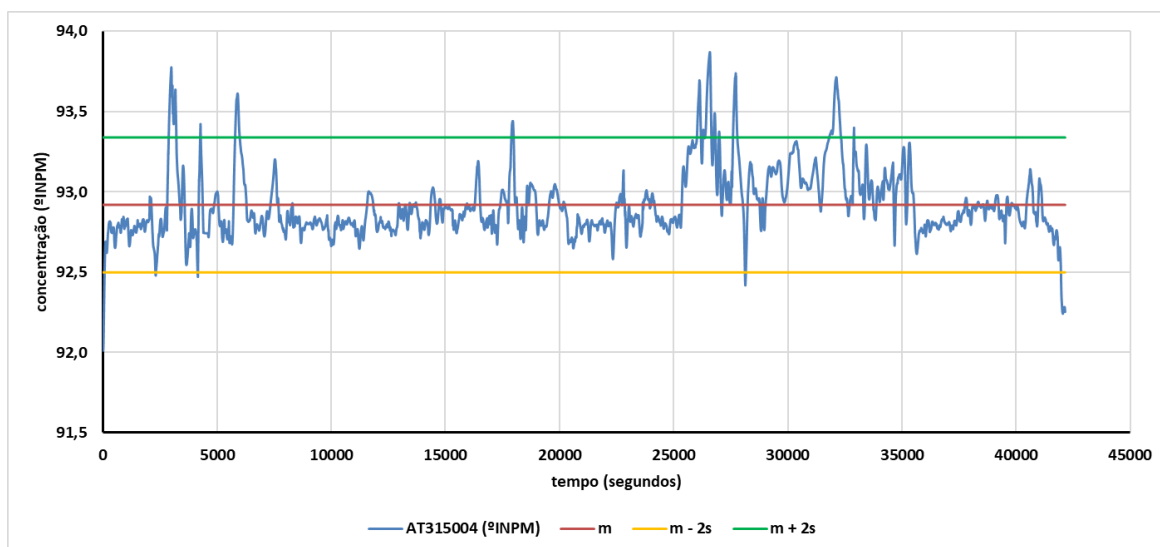


Figura 4.1 – Carta de controle para a concentração alcóolica na saída da coluna B1
Fonte: autoria própria

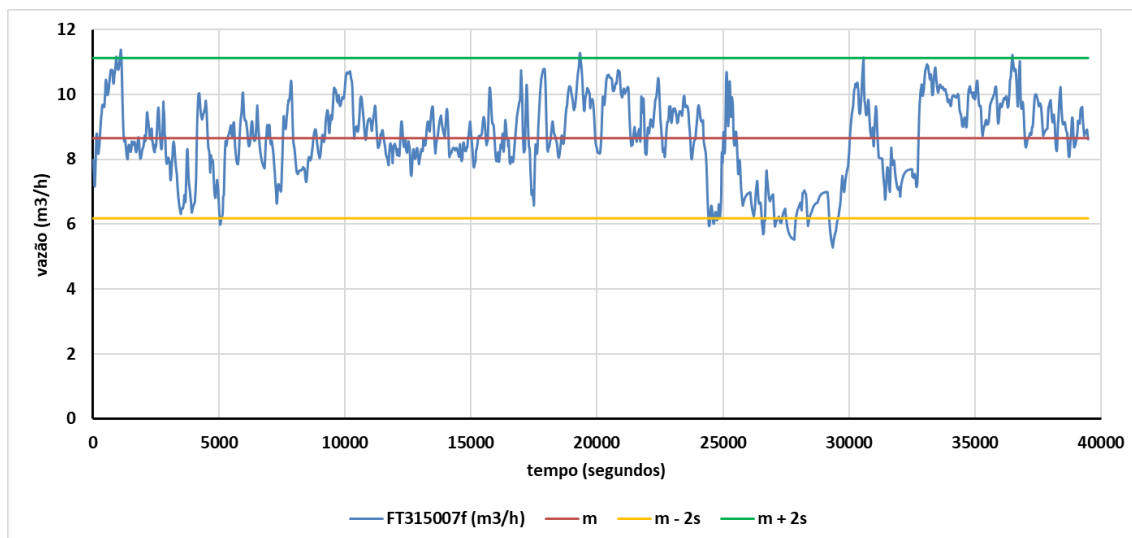


Figura 4.2 – Carta de controle para a vazão de álcool na saída da coluna B1
 Fonte: autoria própria

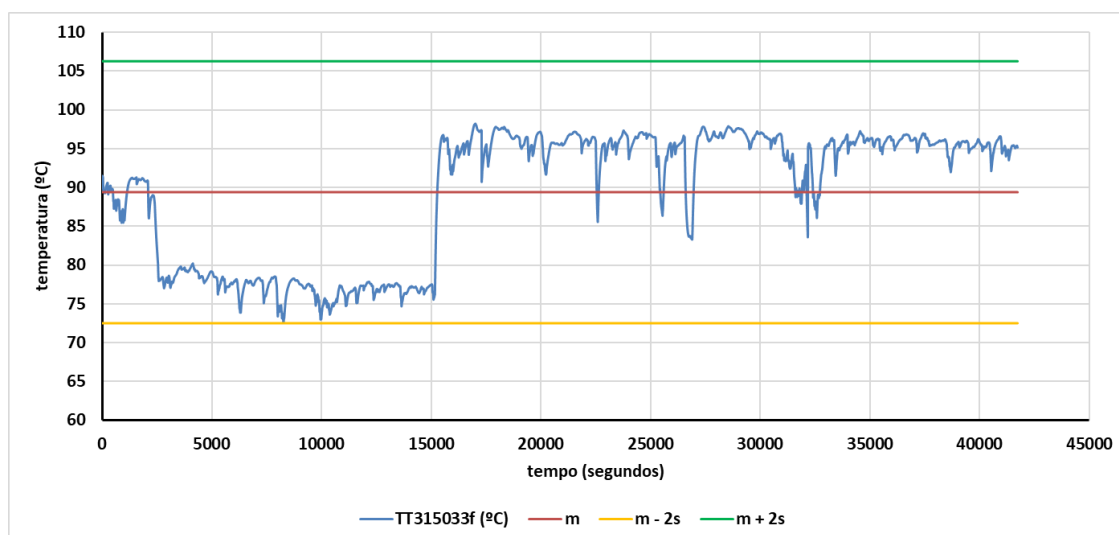


Figura 4.3 – Carta de controle para a temperatura do álcool na saída da coluna B1
 Fonte: autoria própria

Tabela 4.1 – Valores médios e variabilidade das variáveis de processo estudadas

Variável	Valor	Variabilidade (%)
Concentração	92,9 °INPM	0,45
Vazão	8,7 m ³ /h	28,56
Temperatura	89,4 °C	18,88

Fonte: autoria própria

A primeira constatação que pode ser feita é a de que a concentração alcóolica da saída de topo da coluna B1 apresentou pouca dispersão em torno do seu valor médio, indicando que

a operação da coluna teve por foco a produção de álcool dentro da especificação técnica minimamente requerida para atender ao requisito de mercado.

Existiram dois intervalos de tempo em que a variável de processo em questão apresentou maior desvio em relação ao seu respectivo valor médio, a saber: (i)- entre os instantes 4.000 seg. e 6.000 seg.; e (ii)- entre os instantes 25.000 seg. e 35.000 seg. Estes desvios poderiam estar associados à diminuição do valor da vazão de saída de álcool na corrente de topo, provavelmente para aumentar a concentração alcóolica.

Com base no comportamento da vazão observado na Figura 4.1, pode-se afirmar que a partir do instante 25.000 segundos ocorreu uma significativa alteração na tendência de comportamento da concentração na saída de topo da coluna de destilação B1. Observa-se nitidamente que o processo em estudo saiu da condição de centralização do seu comportamento, denotando uma perturbação sistemática que poderia ser explicada pela intervenção do operador do processo.

A segunda constatação que pode ser feita é a de que a vazão de saída de álcool no topo da coluna B1 apresentou significativa dispersão em torno do seu valor médio, indicando que a operação da coluna manipulou preferencialmente esta variável e processo para assegurar a produção de álcool dentro da especificação técnica minimamente requerida para atender ao requisito de mercado.

Observando o valor da variabilidade apresentada pela vazão na Tabela 4.1, percebe-se que – de longe – foi o maior valor dentre as variáveis de processo estudadas. Este fato procede, pois uma das maneiras de se garantir que a pureza do álcool produzido se mantenha dentro das especificações é alterar o valor da vazão de saída no topo da coluna B1, como já explicado na Seção 3 deste TCC.

Com base no comportamento da vazão observado na Figura 4.2, pode-se afirmar que a partir do instante 25.000 segundos ocorreu uma significativa alteração na tendência de comportamento da vazão na saída de topo da coluna de destilação B1. Observa-se nitidamente que o processo em estudo saiu da condição de centralização do seu comportamento, denotando uma perturbação sistemática que poderia ser explicada pela intervenção do operador do processo.

A terceira constatação que pode ser feita é a de que a temperatura de saída de álcool no topo da coluna B1 apresentou dispersão em torno do seu valor médio, indicando que a operação da coluna manipulou esta variável e processo para assegurar a produção de álcool dentro da especificação técnica minimamente requerida para atender ao requisito de mercado.

Com base no comportamento da temperatura observado na Figura 4.3, pode-se, também, afirmar que foi mantida a tendência de centralização daquela variável do processo, em que pese a alteração no valor do *set-point* ocorrida no instante 15.000 segundos, quando este foi alterado de aproximadamente 76°C para aproximadamente 96°C.

Muito provavelmente a alteração no valor da temperatura de saída do álcool foi imposta pela equipe de operação da unidade, visando atender a alguma manobra operacional necessária, não podendo ser caracterizada como uma perturbação aleatória do processo. Importante destacar, ainda, que a temperatura também é uma das variáveis de processo usadas para assegurar que a pureza do álcool produzido seja alcançada.

Um resumo da análise realizada é apresentado na Tabela 4.2, que se destina a orientar a análise da tendência de comportamento do processo. De uma maneira geral, as variáveis do processo apresentaram boa centralização no seu comportamento, como apresentado nas respectivas cartas de controle. A exceção a este comportamento seria a temperatura, pois nitidamente houve alteração no valor do *set-point*, o que justifica a perda de centralização do processo. Contudo a dispersão em torno dos valores médios – antes e após a alteração no valor do *set-point* – pode ser considerada relativamente baixa. A vazão de álcool foi – com certeza – a variável de processo mais alterada para manter a concentração (pureza) do álcool produzido no valor desejado. Isto pode ser constatado pelo valor apresentado por sua variabilidade, em que pese o fato de ter mantido a tendência de centralização do comportamento.

Tabela 4.2 – Tendência de comportamento do processo

Variável	Centralização do processo	Variabilidade
Concentração	sim	pequena
Vazão	sim	elevada
Temperatura	parcial	elevada

Fonte: autoria própria

5 CONCLUSÃO

O estudo realizado neste trabalho, permitiu a avaliação de situações tipicamente encontradas em operações de colunas de destilação de usinas produtoras de álcool.

Foi utilizado o Controle Estatístico de Processo para representar o comportamento das variáveis de processo de interesse no estudo que foram a concentração (pureza) a vazão de álcool e a sua temperatura de saída pelo topo da coluna B1.

Em que pese o fato de a análise realizada apresentar limitações quanto à fenomenologia envolvida no processo, os resultados obtidos permitiram verificar a coerência do comportamento das variáveis de processo consideradas, sendo possível avaliar a contribuição individual de cada variável de processo estudada.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a pureza do álcool é afetada pela alteração dos valores de vazão e da temperatura, sendo a primeira a variável mais relevante. Pode-se, ainda, concluir que as variações pontuais ocorridas nos valores da vazão e da temperatura não apresentaram impacto significativo sobre a pureza do álcool produzido.

Adicionalmente, esse trabalho permitiu que um conteúdo abstrato que diz respeito ao comportamento dinâmico de um sistema seja traduzido de maneira simples e observável ao estudante do curso de graduação, facultando a este a melhoria do processo de apropriação do conhecimento.

É recomendada a continuidade deste trabalho, contemplando o funcionamento do sistema de controle automático da coluna, usando para este fim modelos matemáticos semiempíricos identificados e – se possível – a realização de perturbações controladas nas variáveis de processo consideradas para validar o estudo realizado neste TCC.

REFERÊNCIAS

- BRITTAIN, H. **Performance Assessment for Management – ISA Show Houston Fall 2003**. Disponível em: <https://www.techplus.com.br/tecnicas-controle-avancado/> Acesso em: 10 dez. 2022.
- GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. São Paulo, SP: EDUSP, 2005, 678p.
- BARBOSA, T.G.G. **Análise de variabilidade em malhas de controle de coluna de destilação utilizadas em usinas de álcool**. . Uberlândia, MG: Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso.
- PEREIRA JUNIOR, W.V. **Resumo sobre as características de operação de colunas de destilação em usinas de álcool**. Comunicação Pessoal: UFU/MG, 2022.
- LUYBEN, W. L. **Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers**. 2nd ed. McGraw-Hill 1990;
- MELO JR., P.A.; PINTO, J. C. C. da S. **Introdução à Modelagem Matemática e Dinâmica Não Linear de Processos Químicos**. Rio de Janeiro, RJ: COPPE - UFRJ, 2008.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 4 ed., New York, NY: John Wiley & Sons, 2000, 816p.
- OLIVEIRA JUNIOR, H.G.; OLIVEIRA, L.C.R.; TORRES, B.S. **Métodos de monitoramento, redução e controle de variabilidade em processos industriais**. *Intech*, 92, s.d., pp. 16-22.
- SEBORG, J. M.; EDGARD, T.F.; MELLICHAMP, D. A. **Process Dynamics and Control**. 1 ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1989.
- VAN DEN BERG, R.A.; VAN DE MORTEL-FRONCZAK, J.M.; ROODA, J.E. **Sources of Process Time Variability**. Eindhoven University of Technology, 2002 (*white paper*)
- WHEELER, J. M. **Getting Started: Six-Sigma Control of Chemical Operations**. *CEP Magazine*, 98 (6), 2002, pp. 76-81.