

REAPROVEITAMENTO DO ETANOL DE SEGUNDA NA LIQUIDAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO EM USINAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

Manoel Carneiro Barreto¹

Fabiola Medeiros da Costa²

RESUMO

Há uma grande expansão da produção de etanol no Brasil em virtude de novas fontes renováveis de energia para atender as fortes demandas de produtos deste seguimento. As usinas estão na busca de fontes sustentáveis tanto em seus produtos como em seus processos para se manterem no mercado cada vez mais competitivo. O objetivo deste trabalho é mostrar o resultado obtido mediante o processo de desidratação do etanol de segunda classe na Usina de cana de açúcar da cidade de Quirinópolis/GO no final de safra; questões relacionadas ao controle de qualidade de forma sistemática; aprimorar o processo produtivo de forma contínua, de modo a minimizar as perdas do etanol que é descartado como rejeito por não atingir a graduação alcoólica necessária para ser comercializado como etanol hidratado. A otimização do processo produtivo das usinas de açúcar se torna benéfico, pois busca reduzir a perda em todo o processo de forma geral, aumentando a produtividade e, bem como a lucratividade das mesmas quando a utilizam de forma sustentável os recursos e as matérias primas disponíveis. Sendo assim, o aproveitamento desse etanol no processo passa a ser uma excelente fonte de renda extra para as usinas, até então considerado uma perda indeterminada.

Palavras chave: Etanol de segunda classe; fontes renováveis; desidratação.

¹ Graduando em Bacharelado em Engenharia de Produção

² Orientadora, Professor Ms. da Universidade de Rio Verde

1 INTRODUÇÃO

A produção de etanol no Brasil por intermédio das usinas de cana-de-açúcar vem crescendo gradativamente em função da necessidade de novas fontes renováveis de energia para complementar o sistema de abastecimento de combustíveis fósseis, dentre outros. Conseqüentemente, a produção de etanol foi alavancada no Brasil.

De acordo com Belicanta (2004), o processo de destilação para obtenção do etanol culmina na separação do vinho fermentado mediante a diferença de volatilidade dos elementos de mistura na qual se utiliza o vapor na evaporação e destilação de seus subprodutos, além de ressaltar a importância da forma com que ocorre o contato do vapor com a mistura (vinho), o que determina a eficiência da separação em função do tempo das fases de estágio que envolvem a taxa de transferência de massa, além das características das colunas que irão determinar a área de contato para destilação fracionada.

Entretanto, devido às perdas recorrentes no fim de safra de uma determinada usina de cana-de-açúcar, localizada na cidade de Quirinópolis, no sudoeste de Goiás, no etanol em que não se consegue atingir a graduação alcóolica necessária para comercialização como etanol hidratado é tido como etanol de segunda classe em virtude do elevado percentual de água, ou seja, é caracterizado como perda de processo. Sendo assim, faz-se necessário buscar alternativas para reaproveitamento desse subproduto até então descartado como rejeito.

A destilaria utilizada para este estudo possui quatro colunas de destilação (destilação fracionada), as quais são fabricadas a partir de aços inoxidáveis, bem como seus componentes internos, bandejas, que tem contato direto com a mistura e o vapor. O vapor de escape que sai após a passagem da turbina (independentemente de sua classificação), com temperatura na faixa de 130 °C. Na planta da determinada empresa existem dispositivos de controle do ambiente, além de análises diárias do produto e dos subprodutos culminantes da destilação, garantindo assim controle do processo.

Sendo assim, o objetivo desse estudo é avaliar o processo de desidratação do etanol de segunda no final da safra, visando maior produtividade no decorrer da safra, reduzindo perdas da destilação por meio da desidratação e reaproveitando este rejeito na produção de etanol, eliminando o excesso de água e analisando a configuração das colunas. Buscar alternativas dentro do processo que otimizem o processo de destilação utilizando o procedimento de desidratação do etanol de segunda no fim de safra.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Essa revisão de literatura busca analisar o processo de destilação, retificação e desidratação, ressaltando a eficiência e o balanço termodinâmico recorrente da separação molecular da variação da volatilidade dos componentes das misturas, em contato com o vapor em fluxo inverso, além de caracterizar os equipamentos e componentes existentes em uma destilaria. Variáveis de processo e aditivos aplicados durante a destilação serão enfatizados, também dada sua importância na eficiência do processo.

2.1.1 Destilação

A matéria-prima, vinho, resultante da centrifugação do vinho bruto da fermentação possui sua composição elementos de natureza líquida, sólida e gasosa podendo estas misturas variar de acordo com o mosto (BELICANTA, 2004).

Destilação é um processo de separação que, na ebulição dos componentes voláteis em meio a uma mistura de dois ou mais produtos diferentes, o vapor de etanol se enriquece gradativamente com componentes leves e densos na mistura da coluna de destilação. O equipamento deve promover o íntimo contato entre as fases, assim permitindo ao longo dos estágios ou recheios a separação da mistura nas colunas destiladoras. E por meio da destilação fracionada, cujo intuito é separar diferentes elementos da mistura devido a variáveis pontos de ebulição que cada um possui, apesar de alguns componentes possuírem pontos de ebulição muito próximos entre si. Assim, é necessário que nos vários estágios da coluna destiladora existam pontos de equilíbrio líquido-vapor para promover a separação em diferentes pontos ao longo das colunas (PRADA, 2012).

Quanto à classificação dos etanóis produzidos, o hidratado tem concentração de 92,6 a 93,8° INPM, já o etanol anidro requer a concentração mínima de 99,3% da massa (INPM) como apontam Barreto e Duarte-Coelho (2008).

Devido ao alto consumo energético durante a destilação existem diversas configurações em colunas de destilação cujo intuito principal é economizar energia, redução de custos e redução de perdas. Logo, a configuração da coluna vai determinar o fluxo dos fluidos, da mistura e do vapor, bem como da transferência de calor e massa (FARIA, 2003).

2.1.2 Processo de produção do etanol hidratado

Para destilar o vinho, o processo requer alguns estágios distintos devido aos diferentes pontos de ebulição dos elementos, (PRADA, 2012). Uma destilaria possui um conjunto de diversas colunas para o processo de destilação, sendo composta por torres cilíndricas dispostas verticalmente em que em seu interior possui estágios separados por bandejas, ou recheios que proporcionam maior eficiência na transferência de calor para separação molecular da mistura após contato com o vapor. Para cada etapa nesse processo de obtenção do etanol é necessário passar por duas colunas para etanol hidratado e ainda mais duas colunas para o etanol anidro (GOUVÊA, 1999).

Belicanta (2004), ressaltando Smith e Delnick (1995), avalia que o projeto das colunas de destilação, juntamente como as bandejas, exigia a minimização de consumo de energia e queda de pressão, ocorrida entre os estágios, buscando um maior tempo de contato entre a mistura e o vapor, assim permitindo maior eficiência do processo, por meio de uma configuração mais favorável à transferência de calor e separação molecular.

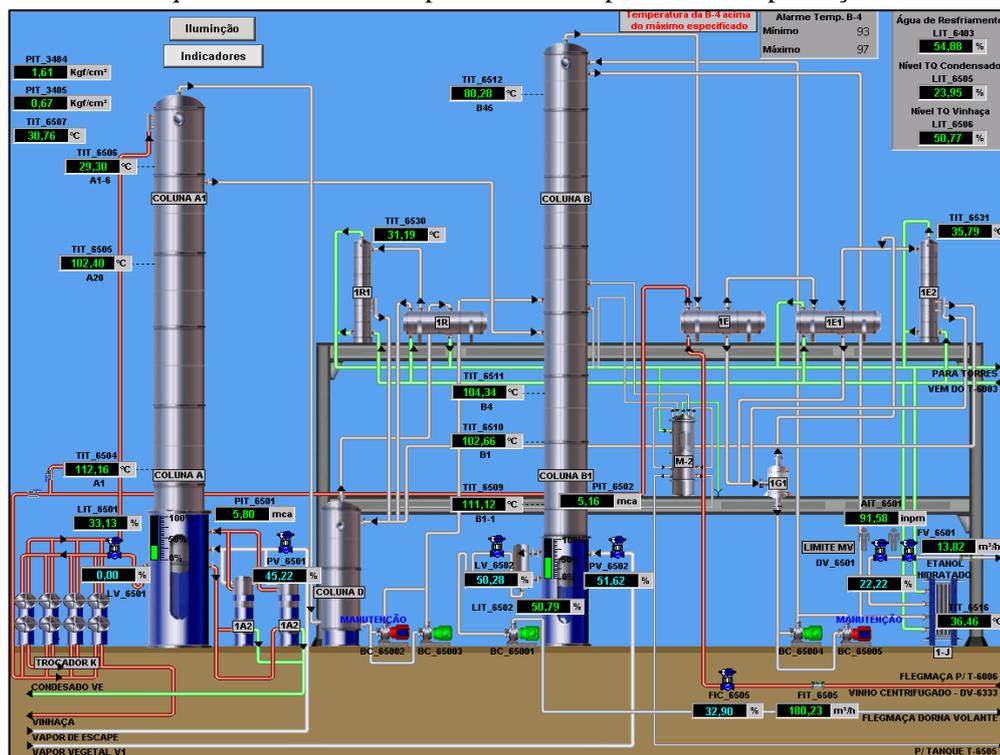
O processo de destilação ainda conta com outros equipamentos como: condensadores, refeedores (reboilers), regeneradores e resfriadores, além dos equipamentos instrumentais de controles (vazão, pressão, temperatura, dentre outros) (BARRETO & DUARTE-COELHO, 2008). Na Figura 1 está o modelo esquemático do controle do processo da destilação do etanol hidratado.

Para produção do etanol hidratado o vinho antes de entrar na coluna de destilação (coluna A1) passa por um aquecedor (1E), onde faz-se a troca térmica com os vapores provenientes da coluna de retificação (coluna B) e, posteriormente, por trocadores térmicos (K) trocando calor com a vinhaça que provém da parte inferior da coluna A que nada mais é do que subproduto do processo da destilação. A vinhaça pode passar por um concentrador de vinhaça ou seguir por tubulações subterrâneas para irrigação da cana-de-açúcar. Todavia o vinho faz a troca térmica com a vinhaça através dos reboilers (1A1 e 1A2) (BARRETO & DUARTE-COELHO, 2008).

O vapor que sai do topo da coluna A1 segue direto para a coluna (D), para concentração dos produtos voláteis. Após passar por essa coluna o vapor é enviado para condensadores (1R1 e 1R), onde ocorre a troca de calor com a água proveniente das torres de resfriamento. Os reboilers são alimentados com vapor de escape de 1,5 kgf/cm² (BARRETO & DUARTE-COELHO, 2008). Nesses condensadores ocorre a extração do etanol de segunda com alta concentração de água.

A coluna B (retificação) é alimentada com a flegma, subproduto da coluna A1 e por parte do condensador R e R, enquanto na coluna B1 (coluna de esgotamento) admite vapor vegetal (V1). Ao fundo da coluna B1, após esgotamento, a flegmaça é enviada para o tanque no setor de fermentação. Enquanto na parte superior da coluna B, dos vapores que contém maior concentração de etanol se extrai o produto que é enviado para condensadores sendo estocado em tanques de armazenamento (BARRETO & DUARTE-COELHO, 2008).

FIGURA 1 – Esquema de controle de processo em supervisório de produção de etanol hidratado



Fonte: Próprio autor, (2016).

2.1.3 Processo de produção do etanol anidro

Anteriormente foi ressaltado o processo pelo qual se tem o etanol de segunda, ou seja, dentro do processo de produção de etanol hidratado. Porém, para se reutilizar esse subproduto, que até então era descartado no final da safra com o esgotamento das colunas, é de suma importância que se tenha entendimento do processo de produção do etanol anidro, já que como o etanol de segunda tem um grande percentual de água em sua composição, é preciso passar por um processo de desidratação, mesmo processo sofrido pelo etanol anidro.

Para a produção do etanol anidro é necessário uma etapa de desidratação, cujo intuito é eliminar o restante de água contida no etanol retificado para que o produto atinja o valor

mínimo de teor alcoólico do anidro: 99,3° INPM. Mas, para isso, é preciso a adição de um agente desidratante (separador) no processo. A destilação azeotrópica tende a baixar o ponto de ebulição da mistura permitindo que a água seja arrastada devido à mistura ternária, sendo o ciclo-hexano adicionado na coluna C, onde ocorre a desidratação (SOARES, 2010).

A coluna de desidratação (C) possui três seções, sendo que a primeira delas (retificação). Neste ponto verifica-se a entrada do elemento desidratante (ciclohexano), localizada na parte superior da coluna, na qual ao topo é retirada a mistura ternária; na 2ª seção (extrativa), percebe-se a separação da mistura binária com o ciclohexano e, na 3ª seção, na parte inferior da coluna é onde se tem o etanol anidro devido ao seu ponto de ebulição maior dentre os elementos da mistura. A partir desse ponto o etanol anidro passa por um condensador e segue para o tanque de armazenagem (BARRETO & DUARTE-COELHO, 2008).

A mistura ternária que sai ao topo da coluna C entra em sequência em condensadores (H e H1). A mistura condensada segue para um decantador, no qual faz a divisão de duas misturas, sendo uma com grande percentual de desidratante e outra com um teor mais inferior. Enquanto a mistura rica em ciclo-hexano é reaproveitada na coluna C, a mistura mais inferior é direcionada para a coluna P onde há a concentração do ciclohexano para reutilização na coluna C (BARRETO & DUARTE-COELHO, 2008).

Outra maneira de se obter o etanol anidro é o processo que se utiliza de peneiras moleculares (PM); o etanol hidratado passa, primeiramente, por um ciclo regenerativo (TC1), fazendo troca térmica com o etanol anidro, saindo do processo e seguindo para os tanques de armazenagem. Essas peneiras são feitas com zeólitos, aluminossilicatos metálicos (grupo de minerais com estrutura cerâmica porosa) (MEIRELES, 2006).

Após esse pré-aquecimento o etanol hidratado passa por um reboiler (EVAP1) para ser vaporizado e, na sequência, por outro reboiler (EVAP2) para superaquecimento. O hidratado agora em fase de vapor passa pela peneira molecular que permite somente a passagem do etanol anidro retendo a água. O mesmo passa por dois condensadores (CR1 e CR2) e, posteriormente, em um resfriador (J) para só então seguir para os tanques de armazenagem. Nesse tipo de sistema são necessárias duas peneiras, pois à medida que uma peneira é saturada devido ao acúmulo de água é preciso fazer a inversão para uma segunda peneira para não interromper o processo, enquanto a primeira delas entra em ciclo regenerativo (BARRETO & DUARTE-COELHO, 2008).

Além dessas formas citadas anteriormente ainda existe a destilação extrativa que ocorre de forma inversa da destilação azeotrópica, pois possui baixa volatilidade, fazendo o arraste da água para a parte inferior da coluna, entretanto o etanol anidro é extraído pela parte

superior com a utilização de um agente extrator, sendo normalmente utilizado o etileno glicol (FIGUEIRÊDO, 2009).

Assim como na destilação azeotrópica, a adição do extrator deve ser realizada acima da alimentação do etanol retificado. Conforme a volatilidade e o ponto de ebulição do solvente altera-se o processo quando o solvente aplicado, por exemplo, possui menor ponto de ebulição é extraído do topo da coluna e o de maior ponto de ebulição no fundo da coluna, como ocorre com o ciclo-hexano. Pode-se aplicar solventes menos voláteis para que o etanol anidro saia pela parte superior da coluna, já os menos voláteis na parte inferior (FIGUEIRÊDO, 2009).

Existem vários tipos de etanol que podem ser produzido pelo processo de destilação:

- Etanol industrial
- Etanol refinado
- Etanol extra neutro
- Etanol de segunda
- Etanol anidro
- Etanol carburante

2.1.4 Etanol industrial

É o etanol padrão melhorado em alguns itens. E para produzi-lo, é preciso repassar pela coluna “C” que tem a função de purificar o etanol por meio da retirada de uma grande quantidade de metanol. Este etanol é fabricado com três colunas “A”, “B” e “C”. Coluna “A”, ou seja de destilação, coluna “B”, de retificação e coluna “C”, de dimetiladora. Está última, funciona como coluna de repasse (VALOCHI, 2006).

2.1.5 Etanol hidratado

É utilizado como combustível nos veículos movidos a etanol hidratado. Esse é um dos processos mais fáceis de ser fabricado a partir das colunas “A” e “B”. A primeira é chamada de destilação, e a segunda de retificadora, onde ocorre a maior concentração do etanol (VALOCHI, 2006).

2.1.6. Etanol anidro

O etanol anidro é fabricado por agente físico, peneira molecular, e químico ciclo hexano. Lembrando que para produzir o etanol europeu o melhor equipamento é a peneira molecular, com INPM acima de 99,8. O etanol anidro com ciclo hexano trabalha com quatro colunas, “A”, “B”, “C” e “P”, sendo a “A” de destilação, a “B” de retificação, a “C” de desidratação, e coluna “P”, isto é recuperação de ciclo hexano e etanol (VALOCHI, 2006).

2.1.7 Etanol extra neutro

É o etanol mais puro, de alta qualidade, destinada ao consumo humano. O qual possui três variações: etanol extra neutro, refinado e destilado alcoólico, sendo de alta qualidade. O etanol extra neutro é utilizado pelas indústrias de bebidas, cosméticos e farmacêuticos e para produzi-lo é preciso trabalhar com quatro colunas, “A”, “B”, “C” e “P”. Coluna “A”, de destilação, a “B”, de retificação, a “C”, de hidro seleção. Nesta é que ocorre o processo que hidrata o etanol com flegmaça e condensado para melhor qualidade do produto coluna “P”, dimetiladora (VALOCHI, 2006)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo visa analisar o reaproveitamento do etanol de segunda no final de safra, para produção de etanol hidratado a partir do sistema de produção de etanol anidro.

No decorrer da safra, o etanol de segunda geração é bombeado novamente para as dornas volantes na fermentação e reutilizado para produção de etanol. No fim da safra é necessário fazer a manutenção das colunas de destilação. Assim, a liquidação do processo ocorre a cada duas colunas. Inicialmente é feita nas colunas A e B. O etanol que se encontra no interior destas colunas terá que ser eliminado para o tanque de passagem com capacidade de 340 m³. A desqualização das colunas é feita através do bombeamento de água quente. O INPM do etanol diminui para até 60, que antes do bombeamento de água encontrava com 92,60. Portanto, o etanol de 60 INPM é o etanol de segunda, o qual é rico em produtos químicos de volatilidades superior a do etanol hidratado. Normalmente são arrastados 30 m³ de etanol para o tanque das colunas A e B. E esse etanol antes era descartado.

O processo de reaproveitamento do etanol de segunda está esquematizado na Figura 2. O etanol de segunda do tanque de passagem é alimentado na coluna C (composta por 52 bandejas) com vazão de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ na bandeja 34, esta é o ponto de referência dessa coluna para uma alimentação precisa. Nesse mesmo ponto entra o recuperado da coluna P, que é essencial para um bom desempenho da coluna C. Se a coluna P não estiver trabalhando dentro dos parâmetros corretos, a coluna C não vai ficar estável, assim há bastante variação do INPM do etanol. Nesta coluna ocorre a desidratação do etanol de 2ª, retirando o máximo possível de água contido na amostra.

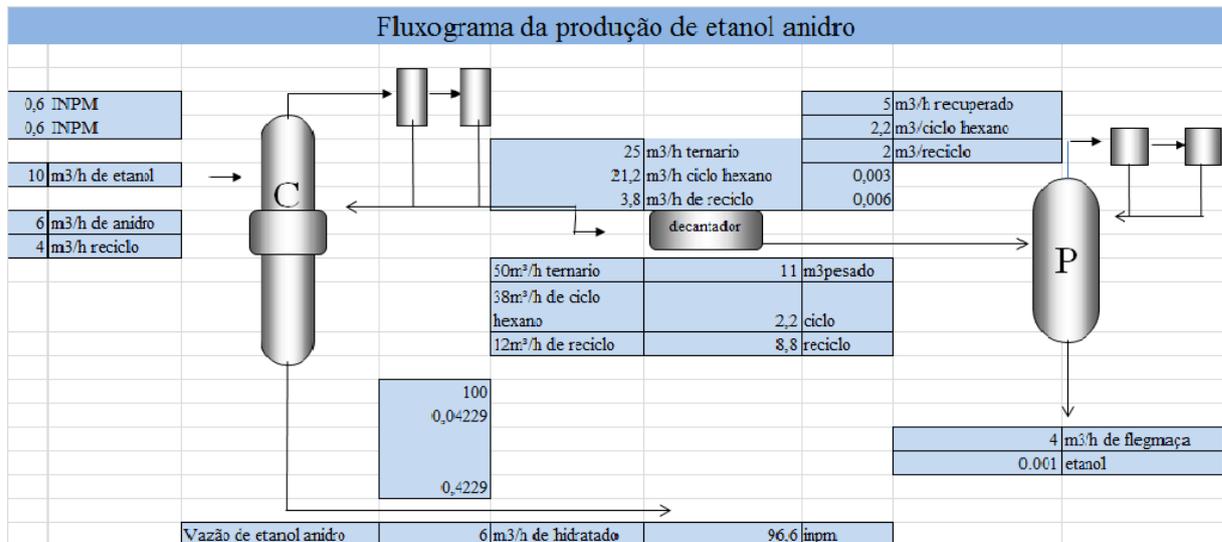
Na coluna P acontece a recuperação do ciclo hexano e etanol. Parte da água que foi retirada do etanol desce para a base dessa coluna, a qual é chamada de flegmaça. Todo o recuperado que possui em sua constituição ciclo hexano e etanol é enviado para coluna C. Esses componentes misturam ao etanol de 2º e sobem para o topo da coluna C, formando assim duas camadas. A camada do topo é chamada de ternário (água, etanol e ciclo hexano), já no meio da coluna C chama-se de binária.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos testes realizados, foi observado que o INPM do etanol varia de acordo com a vazão de etanol de segunda que é alimentado na coluna C. Quanto maior a vazão do etanol de segunda proveniente do tanque de passagem, menor será o INPM. Portanto, a vazão ideal é 10 m³/h. Caso for maior, não atingirá o INPM do etanol desejado (a partir de 92,60), e se for menor, obterá etanol anidro.

Na planilha trabalhada no excel (Figura 3) foi simulada a vazão de entrada na coluna C, o INPM do etanol do tanque de passagem, a vazão de água de saída da coluna P (flegmaça). Alterando os valores das variáveis apresentadas, por tentativa, chegou à conclusão que a vazão de etanol de segunda ideal é 10 m³/h, o INPM do etanol de segunda é 60 e a vazão da flegmaça é 4 m³/h. Com estes valores não houve nenhuma inconformidade no produto final.

FIGURA 3 Fluxograma da produção de etanol anidro, usando para produzir etanol hidratado a partir do etanol de segunda.



Fonte: Próprio autor, (2016).

O processo de desidratação consome bastante energia e água para resfriar o refluxo nas colunas C e P. Mas, o processo final se torna viável para a empresa, pois o vapor de escape que é eliminado do processo de cogeração de energia e o vapor vegetal que é gerado no tratamento do caldo da cana de açúcar precisam ter um destino final, assim, esses vapores são utilizados na base das colunas C e P.

A composição da mistura ternária (topo da coluna C) do processo de desidratação do etanol de segunda não apresentou diferença em relação ao processo de desidratação do etanol hidratado (92,6 INPM) proveniente da coluna B na obtenção do etanol anidro. A Tabela 1 mostra a composição da mistura ternária em percentual em peso. O percentual do etanol foi de 24,43%, 6,20% de água e 69,37% de ciclo hexano. A temperatura de trabalho no topo da coluna C é a de ebulição do ciclo hexano, 62,2 °C.

TABELA 1- Composição da mistura ternária no topo da coluna “C”

Composição	Quantidade
Etanol	24,43% peso
Água	6,20% peso
Ciclo hexano	69,37% peso
Temperatura de ebulição ciclo hexano	62,2 °C

Fonte: Próprio autor, (2016).

A vazão de saída da fase pesada (mistura ternária) do decantador (presente na coluna C) interfere no INPM do etanol hidratado, uma vez que parte da mistura ternária passa pelo decantador e a outra é encaminhada a coluna P. Caso não houver a retirada da mistura pesada contida na fase inferior do decantador, irá prejudicar o bom funcionamento do equipamento.

A Tabela 2 mostra a composição da mistura de ciclo hexano nas fases do decantador. O acompanhamento do percentual de ciclo hexano nas fases é de suma importância, pois a partir dos resultados sabe-se se a carga da coluna C está completa.

TABELA 2- Análise de composição da mistura de ciclo hexano nas fases do decantador.

Composição	Quantidade
Pesado	20% de peso de ciclo hexano
Leve	92% de peso de ciclo hexano
Recuperado	30% de peso de ciclo hexano
Ternário	75% de peso de ciclo hexano

Fonte: Próprio autor, (2016).

Portanto, há o reaproveitamento dos recursos que a empresa oferece, maximizando o processo produtivo e minimizando as perdas do processo de fabricação de etanol hidratado.

Os resultados obtidos nesse processo de reaproveitamento do etanol de segunda mostra com clareza a otimização dos recursos que a empresa tem como mostra a Tabela 3, quanto que a empresa recuperou de etanol.

TABELA 3- Resultados obtidos na recuperação do etanol de segunda

Composição	Resultado
Etanol de segunda com 60° INPM	30 m ³
Água que foi retirada desses 30 m ³	12,18 m ³
Etanol de segunda que passou no processo de desidratação	17,82 m ³
Ciclo hexano utilizado no processo de desidratação	22m ³
O que foi recuperado do etanol em (R\$)	17820 litros x R\$ 1,73 = R\$ 30.000,83
Etanol com 60 INPM, transformado em etanol hidratado	96,20 INPM

Fonte: Próprio autor, (2016).

O monitoramento do parâmetro de trabalho é por meio do sistema de produção supervisório que, por sua vez, é um sistema de alto desempenho que acompanha todo o processo produtivo de produção de etanol.

A otimização do processo produtivo traz benefício e redução de perda em todo o processo. Assim maximizando o lucro da empresa e reduzindo o máximo as possíveis perdas do processo produtivo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora haja uma otimização no processo de produção do etanol, em consequência do reaproveitamento do etanol de segunda, a matriz energética necessita de um consumo mais acentuado de energia (vapor). Portanto, durante o fim de safra, algumas após atingirem as metas do escopo, tendem a utilizar o excedente do bagaço da cana-de-açúcar para cogeração de energia elétrica para comercialização. Assim, como o reaproveitamento desse etanol ajuda também a viabilizar o processo de modo geral, este mesmo processo pode ser utilizado para reprocessar etanol fora de especificação. Caso o mercado precise de uma demanda de etanol anidro maior, pode ser bombeado dos tanques de armazenagem, reprocessando este etanol, ajudando a otimizar o processo produtivo de etanol e também a cogeração de energia. Assim ao invés da empresa comprar energia nessa época do ano, produz sua própria energia e a vende também.

Sendo assim, o aproveitamento desse etanol no processo passa a ser uma excelente fonte de renda extra para as usinas, até então considerado uma perda indeterminada. Esse

processo de recuperação de etanol no final da safra demonstra um processo lucrativo para a empresa.

Mesmo tendo analisadas as variáveis em questões física e química, este estudo permite a sua continuação com análises que mostrar que o processo de produção de etanol anidro também pode aumentar seu lucro no processo de desidratação.

SECOND OF ETHANOL REUSE IN SETTLEMENT FOR ETHANOL PRODUCTION HIDRADATO IN CANE SUGAR MILLS

ABSTRACT

There is a large expansion of ethanol production in Brazil due to new renewable energy sources to meet the strong demand for products of this follow-up. The plants are in the search for sustainable sources both in their products and in their processes to remain in the increasingly competitive market. The objective of this work is to show the result obtained by the ethanol dehydration process second class of plant sugar cane in the city of Goiás Quirinópolis at the end of harvest. Emphasize issues related to quality control systematically improve productive way process continues, in order to minimize losses of ethanol that is discarded as waste by not reaching the required alcohol content to be marketed as hydrous ethanol. The optimization of the production process of the sugar mills becomes beneficial as it seeks to reduce waste throughout the process were generally increasing productivity and yet the profitability of the same to sustainable use of resources and raw materials available.

Keywords: Second-class ethanol. Renewable sources. Dehydration.

REFERÊNCIAS

- BELICANTA, J. Colunas de para-destilação: análise das características hidrodinâmicas e da eficiência de Murphree. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- BARRETO, T. V; DUARTE-COELHO, A. C. Otimização do dimensionamento de aparelhos para obtenção para produção de etanol hidratado. **ANAIS DO 9º CONGRESSO NACIONAL DO STAB**, 2008, Maceió.
- DANTAS, T. S. S. Otimização das variáveis de processo transesterificação do óleo de soja e milho: produção de biodiesel em uma coluna de pratos perfurados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- FARIA, S. H. B. de. **Estudo energético de colunas de destilação através de análise exergética – sistema não ideais**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- FIGUEIRÊDO, M. F. **Obtenção de etanol anidro via destilação extrativa: simulação e otimização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- GOUVÊA, P. E. M. de. **Simulação e análise de configurações alternativas de colunas de destilação: meta e para-destilação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- HUGOT, E. **Manual de engenharia açucareira**. São Paulo: Ed. Mestre Jou, 1977.
- ITO, V. M. **Otimização de colunas de destilação complexas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- LIMA, L. R; MARCONDES, A. A. **Etanol carburante: uma estratégia brasileira**. Curitiba: EditoraUFPR, 248p., 2002.
- MEIRELLES, A. J. A. **Expansão da produção de bioetanol e melhoria tecnológica da destilação alcoólica**. In: FAPESP. Workshop do Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo: Produção de etanol. Lorena, 2006.
- MENEGUETTI, C. C; MEZARROBA, S. Processos de produção do etanol etílico de cana-de-açúcar e os possíveis reaproveitamentos dos resíduos resultantes do sistema. **IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial**, 2010, Campo Mourão, PR.
- MOUSSA, L. S. **Análise termodinâmica de colunas de destilaria visando à otimização energética**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- OLIVEIRA, J. R. G. de. **Avaliação dos pontos determinantes para elaboração de um projeto de destilaria**. Monografia (Bacharelado em Química Industrial) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2011.

OSAKI, M. R. **Análise de um modelo de conversão de cana-de-açúcar em valores energéticos através da integração das tecnologias 1G e 2G – Simulação de Monte Carlo para otimização multiobjetivos.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PRADA, R. J. **Estudo de colunas de destilação de alta eficiência: HIGEE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

SMITH, V. C. DELNICKI, W. V. **Optimum sieve tray design.** Chemical Engineering Progress, Vol. 71, No 8, pp.68-73, Agosto, 1975.

SOARES, R. B. **Estudo da destilação extrativa salina em coluna recheada para produção de etanol.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

VALOCHI, M. **Mix diversificado.** Revide Vip. Edição especial. p. 38-39, 2006.

WANG, G.; XU, Z.; JI, J. **Progress on Hige distillation - Introduction to a new device and its industrial applications.** Chemical Engineering Research and Design, v. 89, p. 1434-1442, 2011.