

# Coleção UAB-UFSCar

Tecnologia Sucrialcooleira

Cláudio Hartkopf Lopes  
Afra Vital Matos Dias Gabriel  
Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges

## Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar

tecnologia de produção de etanol

# **Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar**

tecnologia de produção de etanol



**Reitor**

Targino de Araújo Filho

**Vice-Reitor**

Pedro Manoel Galetti Junior

**Pró-Reitora de Graduação**

Emília Freitas de Lima



**Secretária de Educação a Distância - SEaD**

Aline Maria de Medeiros Rodrigues Reali

**Coordenação UAB-UFSCar**

Claudia Raimundo Reyes

Daniel Mill

Denise Abreu-e-Lima

Joice Otsuka

Marcia Rozenfeld G. de Oliveira

Sandra Abib

**Coordenador do Curso de  
Tecnologia Sucroalcooleira**

Miguel Antonio Bueno da Costa

UAB-UFSCar

Universidade Federal de São Carlos

Rodovia Washington Luís, km 235

13565-905 - São Carlos, SP, Brasil

Telefax (16) 3351-8420

[www.uab.ufscar.br](http://www.uab.ufscar.br)

[uab@ufscar.br](mailto:uab@ufscar.br)

**Cláudio Hartkopf Lopes**  
**Afra Vital Matos Dias Gabriel**  
**Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges**

# **Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar**

tecnologia de produção de etanol

© 2011, Cláudio Hartkopf Lopes, Afra Vital Matos Dias Gabriel, Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges

### **Concepção Pedagógica**

Daniel Mill

### **Supervisão**

Douglas Henrique Perez Pino

### **Equipe de Revisão Linguística**

Ana Luiza Menezes Baldin  
Daniela Silva Guanais Costa  
Francimeire Leme Coelho  
Jorge Ialanji Filholini  
Letícia Moreira Clares  
Lorena Gobbi Ismael  
Luciana Rugoni Sousa  
Marcela Luisa Moreti  
Paula Sayuri Yanagiwara  
Sara Naime Vidal Vital

### **Equipe de Editoração Eletrônica**

Izis Cavalcanti  
Rodrigo Rosalis da Silva

### **Equipe de Ilustração**

Eid Buzalaf  
Jorge Luís Alves de Oliveira  
Priscila Martins de Alexandre

### **Capa e Projeto Gráfico**

Luís Gustavo Sousa Sguissardi

# SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	11
---------------------------	----

## **UNIDADE 1: Introdução à produção de etanol**

1.1	Primeiras palavras .....	15
1.2	Problematizando o tema .....	15
1.3	Histórico .....	15
1.3.1	Destilação .....	15
1.4	Álcool como espécie química .....	17
1.4.1	Aplicações do etanol .....	17
1.5	Produção de álcool .....	18
1.6	Álcool no Brasil .....	19
1.6.1	O Proálcool .....	19
1.6.2	Situação atual do álcool combustível no Brasil .....	20
1.7	Tipos de álcool .....	20
1.8	Produção e comercialização de álcool .....	21
1.9	Produção de cana .....	23
1.10	O futuro do álcool .....	25
1.11	Estudos complementares .....	25

1.12	Considerações finais . . . . .	25
------	--------------------------------	----

## **UNIDADE 2: Processos de fabricação de álcool**

2.1	Primeiras palavras . . . . .	29
2.2	Problematizando o tema . . . . .	29
2.3	Produção de etanol . . . . .	29
2.4	Métodos fermentativos . . . . .	29
2.5	Sacarose . . . . .	30
2.6	Rendimento da fermentação . . . . .	30
2.7	Matérias-primas para produção de álcool via fermentação . . . . .	31
2.7.1	Matéria-prima celulósica . . . . .	31
2.7.2	Matéria-prima amilácea . . . . .	32
2.7.3	Etanol de milho . . . . .	34
2.7.4	Álcool de cana-de-açúcar . . . . .	36
2.8	Corte, carregamento, transporte e deterioração da cana . . . . .	39
2.9	Impurezas da cana . . . . .	40
2.10	Melado e mel final . . . . .	40
2.11	A produção do etanol de cana . . . . .	41
2.12	Estudos complementares . . . . .	42
2.13	Considerações finais . . . . .	42

### **UNIDADE 3: Tratamento de caldo e fermentação do mosto**

3.1	Primeiras palavras .....	45
3.2	Problematizando o tema.....	45
3.3	Tratamento do caldo para a produção de etanol.....	45
3.4	Processos de condução da fermentação .....	48
3.5	Balanço de massa de uma dorna .....	50
3.6	Balanço de massa da centrifugação do vinho .....	52
3.7	Considerações finais .....	55

### **UNIDADE 4: Fermentação do mosto: aspectos de dimensionamento**

4.1	Primeiras palavras .....	59
4.2	Problematizando o tema.....	59
4.3	Introdução .....	59
4.4	Vias metabólicas e balanço energético da fermentação .....	60
4.5	Dimensionamento das dornas.....	61
4.6	Refrigeração de dornas.....	62
4.7	Cálculo de um trocador de calor.....	64
4.8	Centrífuga de vinho .....	65
4.9	Tratamento do fermento pré-fermentador .....	67
4.10	Lavadores de gás .....	68

4.11	Considerações finais .....	69
------	----------------------------	----

## **UNIDADE 5: Destilação do etanol**

5.1	Primeiras palavras .....	73
5.2	Aspectos gerais .....	73
5.3	Gráfico da composição líquido/vapor .....	76
5.4	Destilação do álcool etílico.....	79
5.5	Destilação contínua .....	81
5.6	Destilação de álcool.....	85

## **UNIDADE 6: Desidratação do etanol**

6.1	Primeiras palavras .....	89
6.2	Álcool anidro .....	89
6.2.1	Desidratação por meio do processo azeotrópico .....	90
6.2.2	Desidratação extrativa pelo monoetileno glicol (MEG) .....	93
6.2.3	Desidratação por peneira molecular .....	95
6.2.4	Avaliação dos três processos de desidratação em uso no Brasil.....	97
6.3	Considerações finais .....	98

## **UNIDADE 7: Efluentes da fabricação de álcool e aspectos hídricos**

7.1	Primeiras palavras .....	101
7.2	Problematizando o tema.....	101
7.3	Vinhaça.....	101

7.3.1	Composição da vinhaça .....	103
7.3.2	Vinhaça e o meio ambiente.....	104
7.3.3	Aplicações da vinhaça.....	104
7.3.4	Resfriamento da vinhaça .....	105
7.3.5	Concentração da vinhaça .....	106
7.3.6	Aplicação da vinhaça na lavoura por veículos tanque.....	107
7.3.7	Irrigação por aspersão.....	108
7.3.8	Distribuição de vinhaça por canais.....	109
7.4	Demanda de água para a produção de etanol .....	110

## **UNIDADE 8: Projeto de uma destilaria de etanol de cana**

8.1	Primeiras palavras .....	115
8.2	Problematizando o tema.....	115
8.3	Localização do empreendimento .....	115
8.3.1	Localização: aspectos agronômicos .....	116
8.3.2	Localização do projeto: aspectos logísticos e de infraestrutura .....	117
8.4	Aspectos ambientais e de zoneamento agrícola .....	118
8.5	Capacidade de produção .....	119
8.5.1	Processo tecnológico a ser adotado: operações preliminares .....	119
8.5.2	Processo tecnológico a ser adotado: extração do caldo .....	120
8.5.3	Processo tecnológico a ser adotado: fermentação e destilação.....	121
8.6	Dimensionamento dos equipamentos.....	122
8.6.1	Rendimento industrial em álcool .....	122

8.6.2	Extração do caldo .....	123
8.6.3	Fermentação .....	125
8.6.4	Destilaria .....	126
8.7	Armazenagem de etanol .....	126
<b>REFERÊNCIAS</b>	.....	129

## APRESENTAÇÃO

O setor sucroalcooleiro no Brasil é responsável por aproximadamente 3% do PIB nacional, do qual parte é em função da produção de açúcar e parte, da produção de etanol. No início dos anos 1930, a indústria de álcool combustível teve o seu primeiro grande crescimento a partir do incentivo governamental que tornou obrigatória a adição de 5% de etanol à gasolina.

Em 1933 foi criado o Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), órgão governamental responsável pelo controle da produção de açúcar e etanol, fixando os preços e os regimes de produção, além do monopólio na comercialização externa do açúcar.

Com a crise do petróleo na década de 1970, em que os preços dos barris atingiram valores bastante elevados, o Brasil importava cerca de 80% de suas necessidades. Dessa forma o país se viu frente a um problema financeiro, pois não dispunha de recursos para aquisição do petróleo no mercado externo. As soluções propostas foram o aumento da produção interna de petróleo e concomitantemente a utilização do etanol como combustível automotivo.

Nesse contexto foi instituído o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em novembro de 1975, que buscava incentivar o aproveitamento e desenvolvimento da tecnologia sucroalcooleira para veículos automotores.

Inicialmente, aumentou-se a porcentagem do etanol em mistura à gasolina, atingindo valores de até 25%. Alguns anos depois, já começaram a ser comercializados veículos movidos exclusivamente a etanol. Problemas de abastecimento do etanol que ocorreram durante a década de 1990 provocaram uma resistência e o abandono do uso de veículos movidos unicamente a etanol.

Na década de 2000 houve uma retomada da produção de etanol em virtude do advento dos veículos bicombustíveis, capazes de operar tanto com a gasolina como com o etanol, isoladamente ou misturado em qualquer proporção. Dessa forma a produção de álcool tem se elevado continuamente, ultrapassando 20 bilhões de litros em 2010.



# **UNIDADE 1**

Introdução à produção de etanol



## 1.1 Primeiras palavras

Neste trabalho iremos introduzir a questão do etanol, a sua importância histórica e econômica no Brasil e no exterior.

## 1.2 Problematizando o tema

A produção de etanol para fins combustíveis retomou o fôlego no âmbito nacional na última década. O crescimento da produção de carros populares flex impulsionou o consumo de álcool combustível, e a venda deles, em alguns momentos, ultrapassou a de carros semelhantes com motores a gasolina.

## 1.3 Histórico

A produção de etanol, ou álcool etílico ou simplesmente álcool, pela via fermentativa, é uma técnica que a humanidade domina desde os primórdios da civilização. O ser humano aprendeu que qualquer líquido açucarado, por exemplo, um suco de fruta, quando deixado em armazenamento sob temperatura adequada, transforma-se em uma bebida apreciável. A preparação de bebidas alcoólicas já era conhecida por todos os povos da Antiguidade, como os egípcios, gregos, chineses etc. Os povos indígenas que habitavam o Brasil na época da chegada dos portugueses já produziam uma bebida alcoólica denominada cauim, obtida a partir da fermentação de mosto de mandioca.

A etapa seguinte foi a descoberta da destilação alcoólica, processo que permitia elevar a concentração do álcool das bebidas para obter o que hoje se denomina aguardente (*aqua ardens*, água que arde), cujo teor alcoólico apresenta níveis superiores a 40%. Esse processo também é bastante antigo, existem registros que indicam sua utilização no Egito, já no século I, na cidade de Alexandria, embora sua finalidade estivesse associada à alquimia, e não à bebida. Mas a destilação de fermentados provavelmente teve início nos países mediterrâneos produtores de vinho, como a Itália e a França no século VI. No século XV, a produção de aguardente generalizou-se, e o álcool quase absoluto que se obtinha foi denominado espírito do vinho.

### 1.3.1 Destilação

Para o processo de destilação, o equipamento criado pelos antigos egípcios e aperfeiçoado pelos árabes para a produção de aguardente de elevado teor alcoólico foi o alambique. Ainda hoje ele é utilizado para a produção de

bebidas como o conhaque, o rum e, no Brasil, para a produção da aguardente artesanal de cana, também conhecida como cachaça, cujo teor alcoólico varia de 38 a 48 °GL.

O alambique é composto por dois dispositivos, um evaporador e um condensador: o corpo evaporador é onde o líquido fermentado é aquecido, emitindo vapores alcoólicos que retornam ao estado líquido no condensador. Na Figura 1 pode-se ver um alambique feito de cobre para produzir aguardente.



**Figura 1** Alambique de cobre batido.

## 1.4 Álcool como espécie química

Os álcoois pertencem a uma família de compostos químicos que apresentam um ou mais grupos hidroxílicos ligados a um radical alquila. Dessa família, o mais conhecido, e que é o objeto deste nosso estudo, é o álcool etílico, também denominado etanol ou simplesmente álcool, cuja fórmula química é  $C_2H_5OH$ . No entanto, existem outros álcoois, por exemplo, o metanol, obtido a partir da madeira. Este último tem grande aplicação tanto na indústria quanto como combustível.

**Quadro 1** Características físico-químicas do álcool etílico.

Ponto de fusão	-117,3 °C
Ponto de ebulição	78,35 °C
Massa molecular	46,06 g mol <sup>-1</sup>
Aspecto	Líquido incolor
Solubilidade	O álcool etílico é um composto fortemente polar devido ao radical hidroxila, e por isso tem grande afinidade com a água e com outras substâncias polares. Dissolve também numerosas substâncias orgânicas e inorgânicas, como essências, hidrocarbonetos, graxas etc.
Solubilidade em água	Solúvel em qualquer proporção. A mistura de álcool com água resulta em uma contração do volume.
Índice de refração	1,36 (25 °C)
Viscosidade	1.200 cp (20 °C)

### 1.4.1 Aplicações do etanol

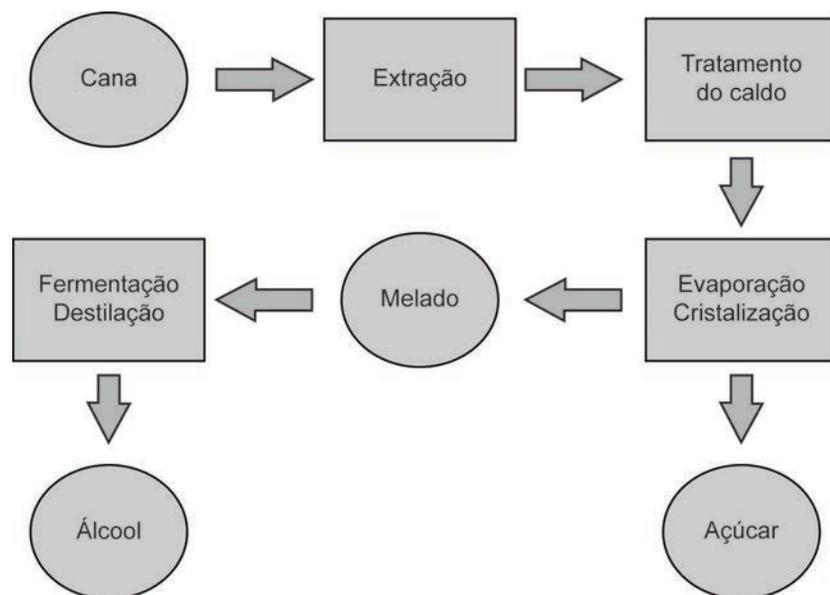
Embora o etanol esteja, nos últimos anos, muito associado a um combustível, ele sempre teve, desde a Revolução Industrial, várias aplicações, das quais podemos citar:

- Alimentício e farmacêutico: como matéria-prima para a confecção de bebidas e vinagre. Tem ampla aplicação na extração de essências vegetais usadas na confecção de perfumes e medicamentos devido à sua propriedade de atuar como solvente de aromas. Também é utilizado na fabricação de vacinas e antibióticos e possui um amplo uso como produto de limpeza e antisséptico.

- **Cosméticos:** é utilizado na confecção de perfumes, desodorantes, cremes e produtos de toalete em geral.
- **Industrial:** participa como componente de detergentes, produtos de limpeza, tinturas, têxteis, solventes etc.
- **Combustível:** o álcool pode ser utilizado como combustível de veículos ou em misturas carburantes. No Brasil, o etanol é utilizado como agente de transesterificação na produção de biodiesel, em que os óleos vegetais na proporção de 80% reagem com etanol em meio alcalino, resultando no monoéster (biodiesel) e na glicerina.

## 1.5 Produção de álcool

O álcool etílico pode ser produzido tanto pela via fermentativa, por meio de diversas matérias-primas, como também pode ser sintetizado quimicamente por meio de produtos minerais. Mais adiante será visto detalhadamente as formas de obtenção desse composto, mas, no Brasil, a quase totalidade do álcool etílico é obtida pela via fermentativa a partir dos açúcares contidos no caldo do colmo da cana-de-açúcar. Em geral, o caldo extraído da cana pode ser utilizado diretamente para a produção de álcool, ou pode sofrer um tratamento, uma evaporação e uma cristalização em que uma parte da sacarose é então recuperada sob a forma de açúcar comercial e outra parte, sob a forma de mel final, que é utilizada na fabricação de álcool. Esse processo de obtenção de açúcar e álcool é o predominante no Brasil, como pode ser visto no fluxograma da Figura 2.



**Figura 2** Fluxograma do processo de fabricação de açúcar e álcool, a partir da cana-de-açúcar.

## 1.6 Álcool no Brasil

O início da utilização do etanol combustível no Brasil foi ao final dos anos 1920 e início de 1930. Em 1927 a Usina Serra Grande (USGA), em Alagoas, lançou um combustível composto por 80% de álcool e o restante de éter. No mesmo ano, surgiu em Recife um combustível denominado azulina, composto por 85% de etanol. Com a queda acentuada nos preços do petróleo na década seguinte, a produção desses combustíveis foi abandonada por não competir com a gasolina.

Durante a Revolução Constitucionalista de 1932, foi desenvolvido no Estado de São Paulo um combustível à base de álcool e óleo de mamona. O pesquisador João Bottene adaptou veículos para utilizarem álcool em uma locomotiva e até um avião para auxiliar os revolucionários paulistas. Mas apesar dessas experiências bem-sucedidas, o álcool continuava a ser pouco competitivo em relação aos derivados do petróleo.

Para incentivar a produção de álcool pelas usinas de açúcar, em 1931, o governo brasileiro tornou obrigatória a mistura de 5% de álcool na gasolina. O consumo de álcool combustível teve um grande crescimento somente durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), quando o álcool chegou a substituir em mais de 40% a gasolina consumida no Nordeste. Entretanto, tão logo cessou o conflito na Europa e na Ásia, o comércio internacional se normalizou, e, conseqüentemente, os preços do petróleo voltaram a baixar, desincentivando o uso do etanol.

### 1.6.1 O Proálcool

O grande avanço na utilização do álcool foi a partir da crise do petróleo no início da década de 1970. Naquela ocasião, o Brasil produzia cerca de 20% do petróleo necessário, e o preço elevado da matéria-prima gerou uma grave crise cambial no país. O governo brasileiro passou então a atuar em duas áreas: a primeira foi incentivar as pesquisas de novas bacias petrolíferas, em especial no oceano; e a segunda foi aproveitar a capacidade ociosa nas usinas de açúcar para produzirem álcool combustível.

Em 14 de novembro de 1975 foi criado pelo governo federal o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), pelo Decreto nº 76.593, com o objetivo de estimular a produção do álcool, visando atender a demanda de combustível líquido pelo país. Por causa desse programa, implantou-se mais de uma centena de destilarias que processavam cana-de-açúcar para a produção unicamente de álcool, denominadas destilarias autônomas.

No início do Proálcool, passou-se a produzir não somente álcool anidro para ser misturado à gasolina, mas também o álcool hidratado, combustível para ser utilizado nos veículos produzidos para funcionarem somente com álcool. Em 1978 foi lançado o primeiro veículo a álcool produzido em série no Brasil. Nessa ocasião, procurou-se também diversificar a matéria-prima para a produção de álcool, sendo implantadas nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Santa Catarina unidades produtoras de álcool a partir da mandioca e, no Triângulo Mineiro, uma unidade produtora de álcool a partir da madeira. No entanto, o baixo custo de produção do álcool a partir da cana resultou no fracasso dessas tentativas de diversificação da matéria-prima.

### 1.6.2 Situação atual do álcool combustível no Brasil

A partir da década de 1990, em razão dos altos preços alcançados no mercado internacional pelo açúcar e da desregulamentação do setor sucroalcooleiro pela extinção do órgão governamental, o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), as destilarias autônomas passaram a implantar unidades produtoras de açúcar anexas. Isso causou o desabastecimento desse combustível, resultando no descrédito pelos consumidores.

A partir dos anos 2000, com o desenvolvimento e a comercialização de veículos bicomcombustíveis, que poderiam utilizar tanto álcool como gasolina, conhecidos como carros flex, o consumidor voltou a se interessar pelo produto. O consumo de combustível de um veículo utilizando álcool é de 20% a 30% maior que o de gasolina, portanto, apenas quando o preço do álcool na bomba está em média 70% mais barato que o litro da gasolina é que seu consumo se torna rentavelmente mais interessante.

Com a criação do Proálcool, a produção brasileira desse combustível cresceu de 1 bilhão de litros, em 1975, para uma média de 20 bilhões de litros, em 2009. Do total de álcool produzido no Brasil, cerca de 80% é destinado ao uso como combustível, 10% é exportado e 10% é utilizado internamente para aplicações em outras áreas, como a indústria química, de bebidas, perfumaria etc.

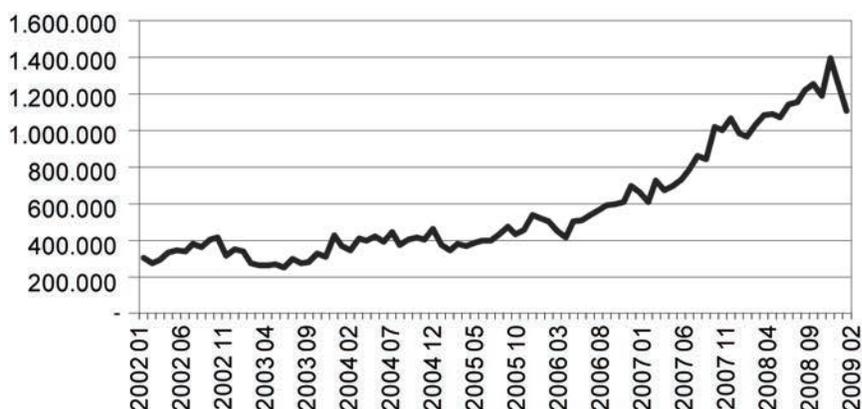
## 1.7 Tipos de álcool

O álcool etílico produzido industrialmente apresenta uma composição que varia em função de sua utilização. Nas próximas unidades veremos detalhadamente os vários itens que classificam o etanol, mas, de maneira resumida, podemos dizer que o álcool produzido no Brasil tem a seguinte classificação:

- Álcool hidratado: normalmente apresenta um teor de umidade residual de 4% a 6%. Esse produto é destinado a ser utilizado como combustível de veículos a álcool ou do tipo Flex. Também pode ser usado como produto de limpeza ou matéria-prima industrial.
- Álcool anidro: esse produto apresenta um teor alcoólico inferior a 1% e seu principal destino é ser adicionado à gasolina numa proporção, atualmente, em torno de 25%.
- Alcoois finos: álcool cuja presença de componentes secundários é bastante baixa, em especial aqueles que poderiam conferir sabor ou odor estranho ao produto. Este álcool é destinado à indústria de bebidas, farmacêutica e de perfumes.

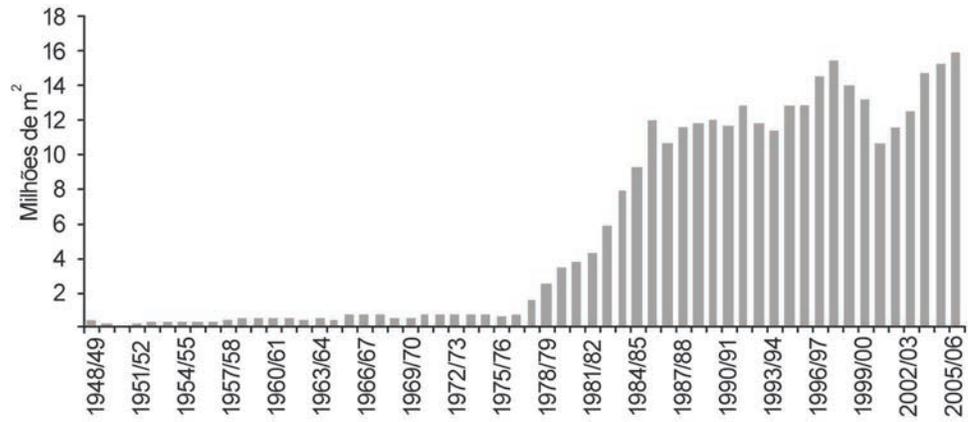
## 1.8 Produção e comercialização de álcool

Como visto anteriormente, o consumo de álcool no Brasil após um período de relativa estagnação que durou até o ano de 2005 entrou numa fase crescente impulsionado pela comercialização dos veículos bicombustíveis e também pelos preços baixos. No Gráfico 1, pode-se observar o comportamento das vendas na década de 2000.



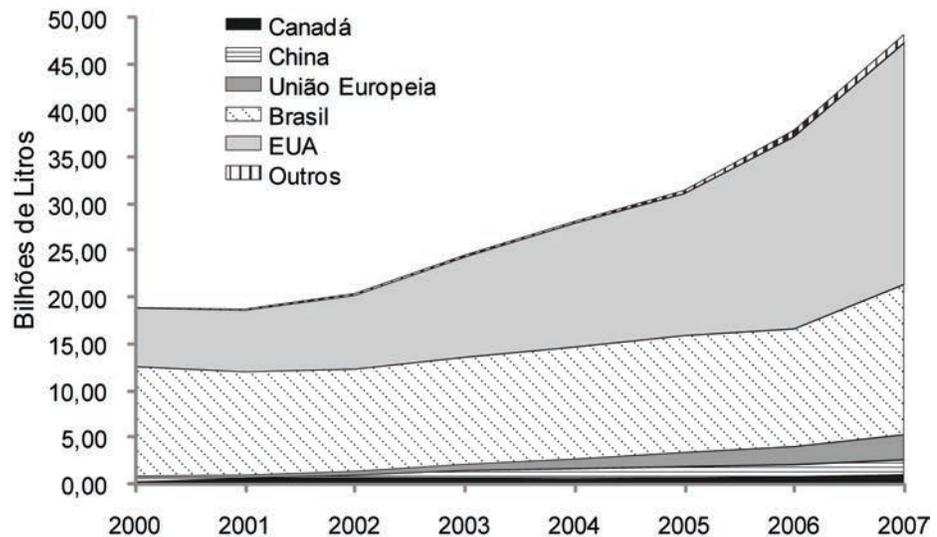
**Gráfico 1** Consumo de etanol para fins combustíveis na década atual (BRASIL, 2007).

A evolução da produção de álcool no Brasil pode ser vista no Gráfico 2 a seguir.



**Gráfico 2** Evolução global da produção de álcool no Brasil.

O consumo mundial de etanol como combustível foi impulsionado nos últimos anos, principalmente, pelo grande aumento da produção pelos EUA, cuja matéria-prima é milho, que veio somar à produção brasileira do álcool de cana. Atualmente, Brasil e EUA respondem por 70% do álcool produzido no mundo, conforme o Gráfico 3 (BRASIL, 2007).



**Gráfico 3** Consumo mundial de etanol como combustível.

Como já visto anteriormente, a utilização do etanol no Brasil como combustível é realizada por dois processos distintos, participando de mistura carburante com a gasolina e também como combustível único. Nos demais países os programas de utilização do etanol estão concentrados mais no uso como componente de mistura carburante. Esse tipo de utilização tem como vantagem a economia de combustíveis fósseis e também a ação antidetonante do álcool, que eleva a octanagem do combustível e o rendimento do motor.

No Brasil, a mistura carburante é realizada na proporção de 25%, na Colômbia 10%, no Uruguai e na França 7%; isso é mostrado a seguir no Gráfico 4.

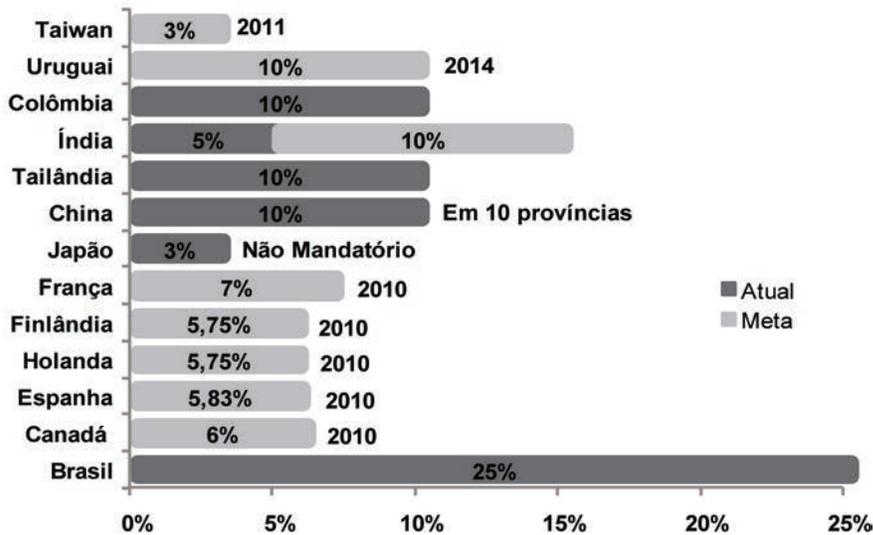
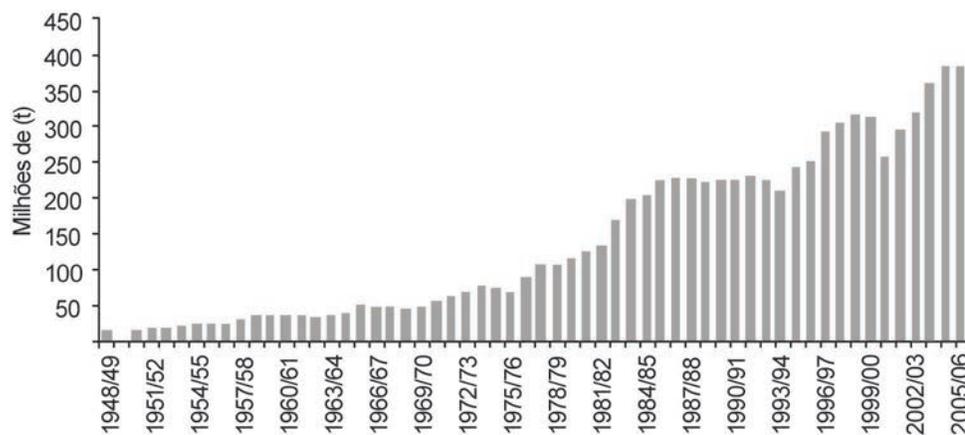


Gráfico 4 Programa de adição de etanol na gasolina em diversos países.

## 1.9 Produção de cana

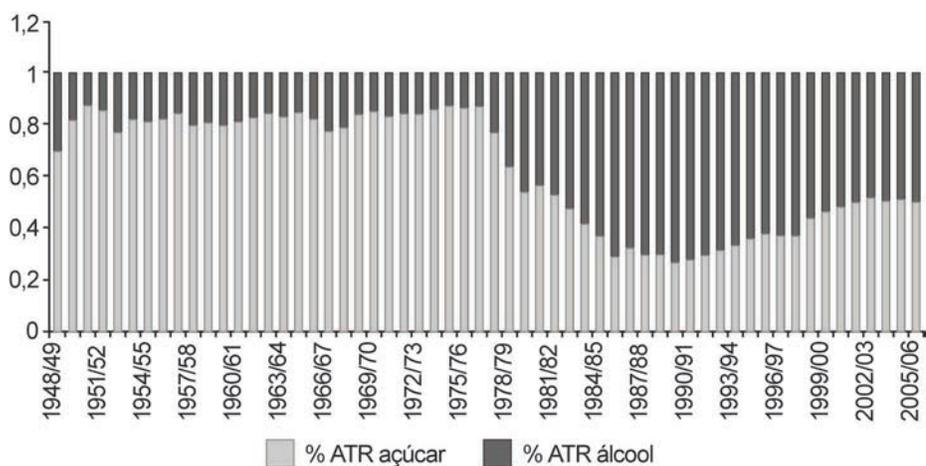
O aumento da produção de álcool no Brasil foi concomitante com o aumento da produção de açúcar, que por sua vez foi consequência do aumento da produção de cana-de-açúcar. Atualmente, o país está produzindo em torno de meio bilhão de toneladas de cana por safra, o que corresponde à terça parte da produção mundial desse vegetal.

Da cana processada no Brasil existe uma situação de quase paridade entre a utilizada para a produção de açúcar e a utilizada para a produção de álcool. Um detalhe que deve ser lembrado é que aproximadamente 20 milhões de toneladas de cana são utilizadas para a produção de aguardente ou cachaça. A evolução da produção de cana pode ser vista no Gráfico 5.

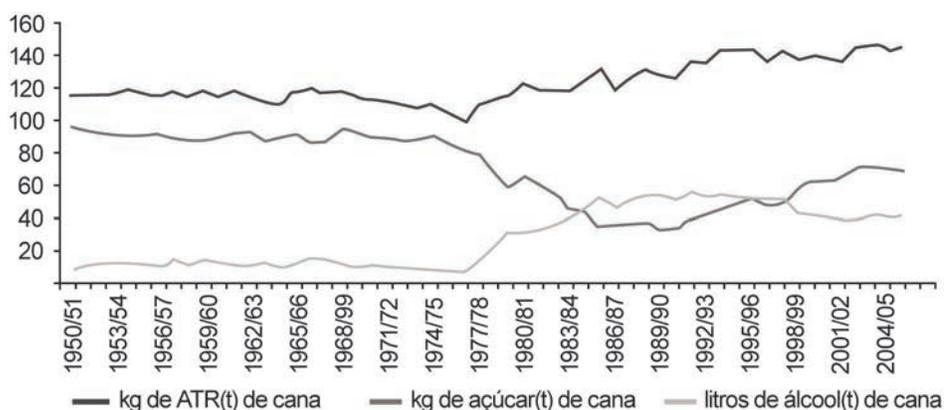


**Gráfico 5** Evolução da produção de cana no Brasil (BRASIL, 2007).

Pelos gráficos a seguir podemos ver que o Total dos Açúcares Recuperáveis (ATR) da cana processada era em grande parte destinado à produção de açúcar até a criação do Proálcool em 1975, e avançando para valores próximos a 50% nos dias atuais.



**Gráfico 6** Distribuição do ATR da cana entre a produção de açúcar e álcool (BRASIL, 2007).



**Gráfico 7** Evolução da quantidade de litros de álcool obtidos por tonelada de cana e quilos de açúcar obtidos por tonelada de cana (BRASIL, 2007).

## 1.10 O futuro do álcool

O Brasil conta atualmente com aproximadamente 400 unidades industriais processadoras de cana-de-açúcar; destas, a grande maioria tem capacidade para produzir açúcar e álcool. As unidades produtoras somente de álcool somam em torno de uma dezena de unidades. Essa tendência de produzir açúcar em conjunto com o álcool deverá continuar, pois significa melhor aproveitamento industrial. Todas as usinas produzem a energia elétrica necessária para seu consumo, e já existem três dezenas de usinas que produzem excedentes de energia que comercializam com as concessionárias públicas de distribuição de eletricidade. Presume-se que esse tipo de indústria continue a melhorar o seu balanço energético para, cada vez mais, dispor de excedentes e assim produzir os três tipos de produtos: o açúcar, o álcool e a energia elétrica.

O álcool como insumo químico para a indústria ou como matéria-prima para confecção de cosméticos, produtos de limpeza, higiene e bebidas tem um futuro assegurado, principalmente por se tratar de uma matéria-prima renovável. A tendência é que o álcool comece a substituir os derivados do petróleo também na área química.

O álcool de cana produzido no Brasil para ser utilizado como combustível concorre com os derivados de petróleo quando estes apresentam o preço do barril superior a US\$ 35. Como esse valor é bastante inferior aos preços atualmente praticados no mercado, podemos concluir que é pouco provável que o petróleo apresente um valor menor que esse. Assim, podemos considerar que o álcool obtido da cana-de-açúcar tem um futuro promissor no Brasil.

## 1.11 Estudos complementares

Leia o artigo *Situação atual e perspectivas do etanol*, de Isaías Macedo (2007).

## 1.12 Considerações finais

A importância econômica que representa hoje a agroindústria canavieira para o Brasil é incontestável. No quesito álcool com finalidade carburante, impulsiona o país ao desenvolvimento ecológico e sustentável, quando comparado aos combustíveis derivados do petróleo, embora não seja ainda o ideal do ponto de vista ecológico. A força do setor no Brasil diminui a dependência dos combustíveis não renováveis, permitindo ao país atravessar com mais tranquilidade possíveis instabilidades nos preços internacionais desses combustíveis.



---

# **UNIDADE 2**

Processos de fabricação de álcool

---



## 2.1 Primeiras palavras

Esta unidade pretende levar o leitor a identificar e compreender as etapas necessárias à produção de etanol na indústria. Trata também das diferentes matérias-primas para a fabricação do etanol, assim como as diferentes formas de este ser obtido industrialmente.

## 2.2 Problematizando o tema

No Brasil o método largamente utilizado na fabricação do etanol é por meio da fermentação através da cana-de-açúcar.

## 2.3 Produção de etanol

Para fins práticos, existem somente duas técnicas para se produzir etanol industrialmente, são elas:

- a) pela síntese química do etanol a partir de outras substâncias químicas;
- b) pela via fermentativa seguida da separação do etanol por destilação.

## 2.4 Métodos fermentativos

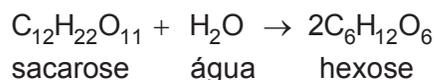
Os métodos de síntese química do etanol são responsáveis por uma pequena fração da produção mundial. Quase toda a produção está concentrada no método fermentativo, em que os açúcares contidos num mosto são transformados em etanol por ação das leveduras, que são uma subclasse dos fungos e estão amplamente espalhadas na natureza. As leveduras diferem dos bolores por se apresentarem predominantemente unicelulares.

Na fermentação, um líquido açucarado denominado de mosto, por exemplo, uma solução do monossacarídeo hexose, sofre a ação da levedura num processo aeróbio, transformando-se em álcool etílico e gás carbônico, conforme a reação a seguir:



## 2.5 Sacarose

Na fermentação do caldo de cana em que a sacarose é o açúcar predominante, existe uma primeira fase que consiste na inversão da sacarose, ou seja, o seu desdobramento nas hexoses glicose e frutose pela ação de uma enzima, a invertase, produzida pela levedura, conforme apresentado a seguir:



Na hidrólise da sacarose ocorre uma reação química em que uma molécula de massa molecular 342,295 resulta em duas moléculas de monossacarídeos (hexoses), de massa molecular 180,155 cada, totalizando 360,310 unidades de massa atômica de produtos da reação, fornecendo a seguinte relação:

$$\text{Relação} = \frac{\text{massa molecular das hexoses formadas}}{\text{massa molecular da sacarose}} = \frac{2 \cdot 180,155}{342,295} = 1,0526$$

Assim, pela hidrólise, 1g de sacarose resulta em 1,0526g de hexose, ocorrendo assim um acréscimo de massa causado pela incorporação da água.

## 2.6 Rendimento da fermentação

Pela equação da fermentação já vista, para cada grama de hexose que participa da reação será gerado 0,5114g de etanol, caso a reação ocorra em sua totalidade, o que não acontece na prática.



$$\text{Relação} = \frac{\text{Massa molecular do etanol}}{\text{Massa molecular da hexose}} = \frac{2 \cdot 46,068}{180,155} = 0,5114$$

Assim esse número é conhecido como fator teórico ou estequiométrico de transformação. Como o álcool é em geral medido tradicionalmente em volume, esse número é expresso em litros de etanol por kg de hexose consumida. Para a transformação das unidades basta conhecer a massa específica a 20 °C, que é 0,7893g/cm<sup>3</sup>.

O valor 0,6479 litros de etanol por quilo de açúcares redutores é conhecido como valor teórico ou estequiométrico volumétrico de transformação fermentativa. Na prática, uma fermentação consegue produzir álcool numa proporção de 80% a

90% desse valor. Assim, denominamos “rendimento de uma fermentação sobre o estequiométrico” a relação entre a quantidade de etanol obtida e a quantidade possível pela equação estequiométrica.

## 2.7 Matérias-primas para produção de álcool via fermentação

A fermentação alcoólica pode ocorrer em qualquer material que contenha açúcares como a glicose ou a frutose, ou que contenha algum composto que possa resultar nesses monossacarídeos por meio da hidrólise. Isso abrange uma variedade de produtos de origem vegetal que podem ser classificados como:

- Lignocelulósicas (celulose e hemicelulose), como a madeira ou o bagaço de cana;
- Amiláceas (amido), como o milho, a mandioca, a batata etc;
- Sacarídeas (mono ou dissacarídeo), como a cana-de-açúcar e a beterraba.

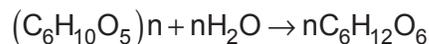
Esses materiais podem ser originários de raízes, como a mandioca; de colmos, como a cana-de-açúcar; de frutas, como a laranja; de grãos, como o milho; e até das folhas, como a palha da cana. A seguir, vamos analisar as principais matérias-primas utilizadas industrialmente.

### 2.7.1 Matéria-prima celulósica

A fórmula da celulose  $(C_6H_{10}O_5)_n$  corresponde a um polímero de cadeia longa, cujo monômero é a glicose, e por isso é classificada como um polissacarídeo. Esse composto é um dos principais constituintes das paredes celulares das plantas, junto com a lignina, hemicelulose e pectina, formando aproximadamente a terça parte da massa dos vegetais. A celulose não é metabolizável pelo ser humano, mas alguns animais, como os ruminantes, podem digerir-la com auxílio de microrganismos.

A celulose foi isolada e caracterizada pela primeira vez em 1838 pelo químico francês Anselme Payen. Consiste em um composto químico de origem vegetal com grandes aplicações industriais, por exemplo, a indústria de papel. A produção de álcool etílico a partir de material celulósico da madeira, do bagaço de cana ou de outro resíduo agrícola é realizada em duas etapas:

- a) Hidrolisar a celulose em glicose por via enzimática ou via ácida, conforme a reação:



b) Fermentar a glicose segundo a equação:



$$\text{Relação} = \frac{\text{Massa molecular do etanol}}{\text{Massa molecular da hexose}} = \frac{2 \cdot 46,068}{180,155} = 0,5114$$

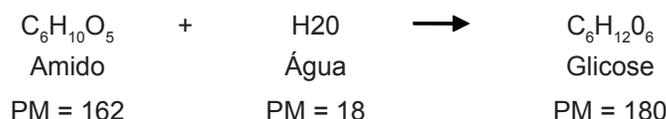
A via ácida, utilizando ácido sulfúrico ou clorídrico, foi a primeira a ser utilizada, seu desenvolvimento ocorreu no século XIX e foi aperfeiçoada desde então, principalmente na Alemanha. No Brasil foi instalada uma unidade para produção de álcool de madeira pela via ácida em 1980, na cidade de Uberlândia no estado de Minas Gerais. Essa unidade foi desativada no final da década de 1980 porque o produto não era competitivo com o álcool feito de cana.

A via enzimática está sendo bastante estudada, existindo uma grande possibilidade de que seja o principal processo industrial empregado para a obtenção de álcool em um futuro próximo.

## 2.7.2 Matéria-prima amilácea

O amido é um polissacarídeo presente nas plantas e formado pela fotossíntese. Por hidrólise, o amido decompõe-se em seu monômero, a glicose. É encontrado na forma de grãos nas sementes, caules e raízes de várias plantas como trigo, mandioca, arroz, milho, feijão, batata, entre outras.

Para a produção de álcool, o amido deve ser inicialmente hidrolisado, conforme a equação química a seguir:



Assim, para cada 162g de amido que participa da reação, teremos após a sua hidrólise 180g de glicose, ou seja:

$$\frac{\text{Glicose}}{\text{Amido}} = \frac{180}{162} = 1,11 \text{ kg de glicose por kg de amido}$$

Concluindo, teremos 1,11g de glicose para cada 1g de amido hidrolisado.

As principais fontes de amido utilizadas industrialmente são o milho, a mandioca, a batata. O maior produtor mundial de álcool são os EUA, que utilizam amido de milho como matéria-prima. No Brasil, produziu-se álcool de mandioca até 1980, quando as unidades existentes ou encerraram suas atividades ou passaram a operar com cana-de-açúcar.

A produção de álcool de material amiláceo originário da mandioca é realizada nas seguintes etapas:

- a) Lavagem dos tubérculos e fragmentação em moinho de martelos, reduzindo-os a fragmentos menores que 1mm.
- b) O material fragmentado é misturado com água e, em seguida, cozido.
- c) Com o uso de alfa amilase, o amido é hidrolisado em glicose.
- d) O líquido rico em glicose resultante é então fermentado e destilado.

O cálculo do rendimento de uma destilaria de álcool de mandioca pode ser realizado da seguinte forma:

$$\frac{L. \text{ álcool}}{T. \text{ cana}} = (1,11 \cdot \% \text{ de amido}) \cdot 6,47 \cdot a \cdot b \cdot c$$

em que:

- rendimento da conversão enzimática do amido em glicose;
- rendimento do processo fermentativo de conversão da glicose em álcool;
- rendimento da destilação.

Considerando um material amiláceo com 30% de amido, por exemplo, a mandioca, e os rendimentos como:

- conversão enzimática: 0,98
- fermentação: 0,89
- destilação: 0,96

teremos:

$$\text{litros/tonelada} = (1,11 \cdot 30) \cdot 6,47 \cdot 0,98 \cdot 0,89 \cdot 0,96$$

180,4 litros/tonelada mandioca

**Quadro 2** Parâmetros agrícolas e industriais entre a produção de etanol de mandioca e a de cana-de-açúcar.

Componente	Mandioca	Cana-de-açúcar
Produtividade agrícola (t/ha · ano)	30,0	80,0**
Açúcares totais (%)	35,0	14,5**
Produtividade em açúcares (t/ha · ano)	10,5	11,6
Conversão teórica (m <sup>3</sup> /t açúcares)	0,718	0,681
Produtividade etanol (m <sup>3</sup> /ha · ano)	7,54	7,90
Preço CIF matéria-prima (R\$/t)	110,00	38,70
Custo unitário etanol (R\$/m <sup>3</sup> )	437,66	391,90

Fonte: adaptado de Cabello (2005).

\*Preços de maio/2005

\*\*Dados ÚNICA/SP de maio/2005

### 2.7.3 Etanol de milho

O milho é um cereal cultivado em grande parte do mundo e utilizado tanto como alimento humano como ração para animais, pois a sua composição lhe confere inegáveis qualidades nutricionais, estando presente nele a maioria dos aminoácidos conhecidos:

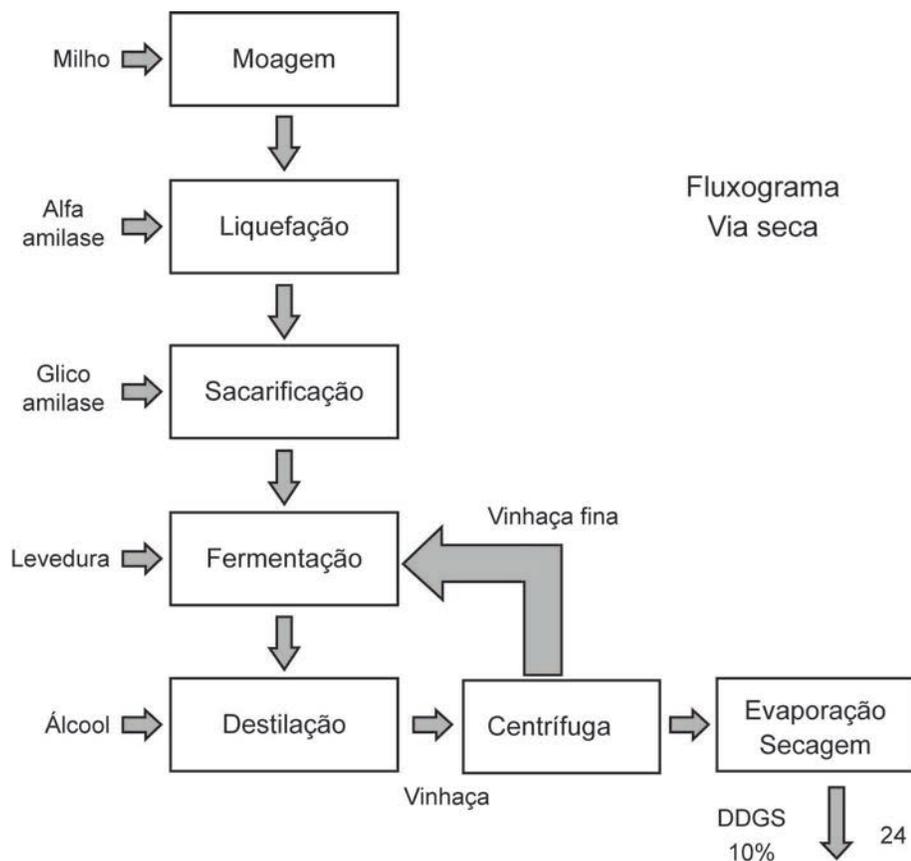
- Amido: 70% a 75%;
- Proteína: 10%;
- Gérmen: 4% a 5%;
- Fibra: 3% a 4%;
- Cinzas: 2%.

Existem diversas espécies e variedades de milho, todas pertencentes ao gênero *Zea*. Todas as evidências levam a crer que seja uma planta de origem americana, já que era cultivada desde o período pré-colombiano.

O milho possui alto potencial produtivo e seu cultivo tem elevada mecanização. É cultivado em diversas regiões do mundo e seu maior produtor são os Estados Unidos. Entretanto, o Brasil também é um grande produtor e exportador desse produto, sendo os estados de São Paulo e Paraná os líderes de produção. A produção mundial de milho na safra 2010/2011 atingiu valores ao redor de 800 milhões de toneladas, das quais 300 milhões corresponderam à produção dos EUA.

Atualmente cerca de apenas 15% da produção brasileira destina-se ao consumo humano e, mesmo assim, de maneira indireta, na composição de outros produtos. Isso se deve principalmente à falta de informação sobre o milho e à ausência de uma maior divulgação de suas qualidades nutricionais, bem como aos hábitos alimentares da população brasileira que privilegia outros grãos.

O álcool de milho pode ser produzido por dois processos: o primeiro, por via úmida, predominante até 1990, e o segundo, pela via seca, o mais utilizado atualmente. O processo via seca resulta num coproduto conhecido como DDGS (*distillers dried grains with solubles*), muito utilizado como ração animal. Na Figura 3 apresentamos um fluxograma simplificado desse processo.



**Figura 3** Fluxograma do processo de produção de álcool de milho pela via seca.

#### 2.7.4 Álcool de cana-de-açúcar

A cana é a matéria-prima mais importante para a produção de etanol e praticamente a única utilizada no Brasil. É um vegetal formado por uma parte fibrosa, em que predominam a celulose, hemicelulose e lignina, e por uma parte líquida, denominada caldo ou garapa, formada por uma solução cujo principal soluto é a sacarose.

A cana-de-açúcar é um vegetal pertencente à família das gramíneas do gênero *saccharum*, natural da Ásia e cujos colmos são ricos em sacarose. Sua composição é a seguinte:

- Água: 70%;
- Fibra: 13%;
- Material solúvel: 17%;
- Sacarose: 15%
- Pureza: 88%.

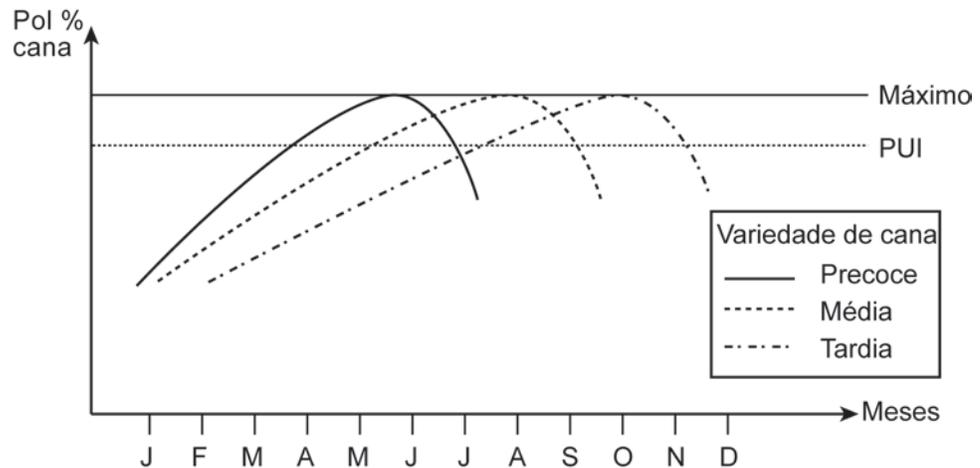
O caldo da cana, muitas vezes denominado caldo absoluto por corresponder ao caldo efetivamente contido na cana, apresenta a seguinte composição (em porcentagem):

- Sacarose: 14,5 a 24,0;
- Glicose: 0,2 a 1,0;
- Frutose: 0,0 a 0,5;
- Aminoácidos: variável;
- Gorduras e ceras: variável;
- Corantes: Variável;
- Ácidos: variável;
- Sais minerais: 0,2 a 0,7.

O teor de fibra na cana-de-açúcar é um fator muito importante sob o ponto de vista tecnológico, devendo estar entre 12% a 13%. Por um lado, os baixos teores de fibra tornam o colmo da cana de moagem mais fácil, consumindo menos energia nessa operação, e resultando em maiores valores de extração da sacarose. Por outro lado, esse baixo teor de fibra significa baixa produção de bagaço, tornando necessária uma complementação energética para fechar o balanço energético da indústria.

Já os altos teores de fibra geram maior quantidade de bagaço, e isso significa excedente energético. Entretanto, tornam a moagem difícil e exigem altas potências nas moendas, resultando também em baixa extração pelas moendas ou pelo difusor.

A principal característica da cana-de-açúcar é seu teor de açúcares totais. O valor desse teor varia ao longo do ano e pode ser constatado por meio da curva de maturação. A configuração dessa curva varia em função de uma série de parâmetros, dos quais os preponderantes são as variedades de cana, as características climáticas da região de cultivo, entre outros.



**Gráfico 8** Exemplos de curva de maturação de cana-de-açúcar.

Sob o ponto de vista da curva de maturação, a cana pode ser classificada em variedades chamadas precoce, média e tardia. Pertence à variedade precoce quando o seu teor de sacarose atinge um máximo no início da safra; média quando o teor máximo ocorre no meio da safra; e tardia quando apresenta um máximo no final da safra. Na região Centro-Sul do Brasil, a safra de cana historicamente tinha início em maio e término em outubro. Atualmente a safra tem iniciado mais cedo, com a introdução de variedades super precoces, começando em março ou abril e encerrando, em muitos casos, em dezembro.

Além do teor de açúcares ou teor de sacarose, outro parâmetro que indica se a cana está em condição de ser industrializada é a sua pureza. Essa pureza corresponde à porcentagem de sacarose em relação aos sólidos totais dissolvidos no caldo. Na prática, a pureza é determinada como sendo a relação entre a polarização e o Brix refratométrico do caldo, expresso em porcentagem:

$$\text{Pureza} = 100 \frac{\text{Polarização}}{^{\circ}\text{Brix}}$$

A pureza da cana-de-açúcar revela suas condições para industrialização, podendo ser utilizado o seguinte critério de avaliação:

- Pureza muito baixa: < 80%;
- Pureza baixa: de 80% a 85%;
- Pureza média: de 85% a 90%;
- Pureza alta: > 90%.

## 2.8 Corte, carregamento, transporte e deterioração da cana

Quando a cana apresenta um teor de sacarose e pureza dentro dos estipulados, ela já está em condições de ser industrializada. Desse modo, ela deve ser colhida e transportada até a unidade industrial onde será processada. Sua colheita pode ser realizada das seguintes maneiras:

Colheita manual de cana crua: processo praticamente abandonado há várias décadas, em que o cortador de cana retirava manualmente a palha e a ponta da cana. O grande problema desse sistema era a baixíssima eficiência.

Colheita manual de cana queimada: esse foi o procedimento que se tornou predominante desde a década de 1970, tendo sido hegemônico até 2005. Esse sistema exige um menor contingente de mão de obra, mas a queima da cana traz problemas ambientais. Por isso, a legislação, especialmente do Estado de São Paulo, está abolindo essa prática.

Colheita com máquina, de cana inteira ou picada: procedimento que já está predominando no Estado de São Paulo, devendo substituir o corte manual em poucos anos. Esse sistema apresenta grandes vantagens ambientais por prescindir das queimadas e por ter baixa necessidade de mão de obra. Suas desvantagens são os altos custos das colhedeiras, a impossibilidade desse equipamento operar em solo com inclinação superior a 12% (que corresponde a 30% das áreas com cana do Estado de São Paulo). Além disso, ocasiona problemas sociais como o desemprego, já que cada máquina pode substituir até cem cortadores.

Após o corte, a cana sofre uma série de transformações de ordem fisiológica, microbiológica e tecnológica, causando problemas no processo de produção de açúcar, álcool e aguardente. O processo de respiração celular, com o consequente consumo de açúcar e a perda de água, resulta no aumento da fibra no colmo.

A deterioração biológica da cana é causada principalmente pela ação de microrganismos, como o *leuconostoc mesenteroides*, que penetram pelas partes segmentadas ou por rachaduras provocadas pela queima e pelo corte dos colmos, e produzem uma goma denominada dextrana. A dextrana causa diversos problemas na indústria e no produto final.

O tempo transcorrido entre a queima e a moagem deve ser o menor possível, pois a cana queimada deteriora mais rápido que a cana crua em razão das rachaduras no colmo, ocasionadas pelo calor, em contato com o solo que causam contaminação e deterioração microbiológica.

A cana picada em toletes está tendo uma aceitação crescente em virtude do aumento da mecanização, apesar de ser mais suscetível a deterioração microbiológica por apresentar grande número de pontos segmentados nos quais os microrganismos podem penetrar. Esse tipo de cana tem de ser processada até no máximo 12 horas após o corte.

Os problemas que ocorrem com a cana após o corte podem ser resumidos da seguinte maneira:

- grande aumento da quantidade de gomas no caldo;
- aumento do teor de acidez;
- aumento da cor do produto final (açúcar);
- aumento do teor de açúcares invertidos (redutores);
- aumento do Brix e da fibra da cana;
- queda da pureza da cana.

## **2.9 Impurezas da cana**

A quantidade de matéria estranha que acompanha a cana queimada e colhida manualmente pode variar de 4%, ou menos em dias secos, a 15% em dias úmidos. Em Porto Rico, no Caribe, chegou-se a determinar até 25% de matéria estranha. Esse tipo de material, também denominado de impurezas, é composto de areia, argila, pedras, palha etc.

A cana queimada por exsudar mel torna-se pegajosa carreando mais impurezas. A cana plantada em solo arenoso pode gerar menor quantidade de impurezas, pois a tendência desse material de aderir o colmo é menor. Já em solo argiloso o cultivo tende a resultar em canas com maior teor de matéria estranha, dada a maior facilidade de aderência desse material nos colmos.

## **2.10 Melado e mel final**

Nas unidades produtoras de açúcar, uma grande parte da sacarose da cana é cristalizada e comercializada. Em geral, 80% da sacarose da cana pode ser transformada em açúcar comercial, e o restante, 20%, resulta num subproduto denominado mel final, melado ou mel esgotado. Esse produto ainda contém uma quantidade significativa de açúcar e é um excelente substrato para a fermentação alcoólica.

O mel final tem uma composição bastante variada em razão do tipo de tratamento a que o caldo foi submetido, da fração de sacarose que foi recuperada sob a forma de açúcar, entre outros fatores. Um exemplo de composição de um mel final, em que 80% da sua constituição é de sólidos solúveis e o restante é de água, pode ser visto a seguir:

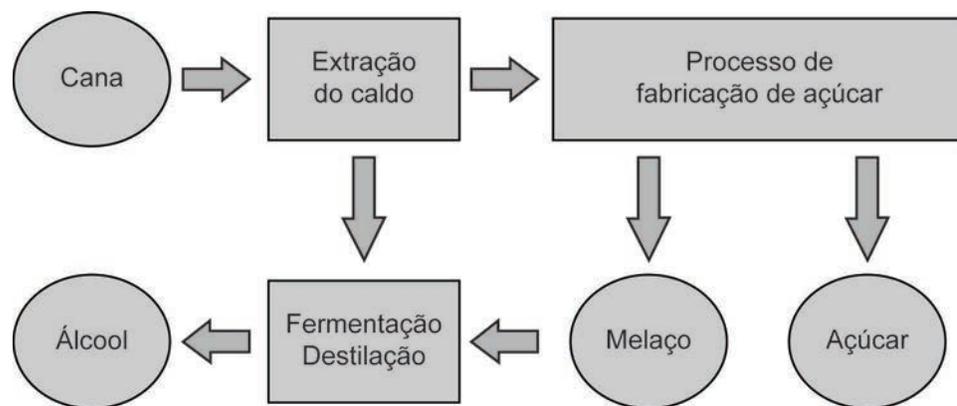
- Água: 20%;
- Sacarose: 35%;
- Glicose: 7%;
- Frutose: 9%;
- Outros carboidratos: 4%;
- Cinzas: 12%.

O principal destino do melaço no Brasil é a produção de álcool, mas uma parte tem outros destinos, por exemplo, como componente de ração animal. O melaço é utilizado para a produção do sal de aminoácido glutamato monossódico, para a produção de ácido cítrico, ou, ainda, de fermento para a panificação. Na América Central peninsular e no Caribe, o melaço é matéria-prima para a produção de rum.

## **2.11 A produção do etanol de cana**

O álcool pode ser produzido diretamente da cana nas chamadas destilarias autônomas. O processo consiste na extração do caldo por moendas ou difusor, seguido de um tratamento, da fermentação e da destilação, como a partir da fermentação do melaço resultante da fabricação do açúcar.

Atualmente as destilarias autônomas são raras, pois a maioria das unidades passou na década de 1990 a produzir também açúcar por motivos econômicos, uma vez que é mais interessante dispor de dois produtos para comercializar, em especial quando se sabe que o preço do álcool apresenta grandes oscilações. A usina processa a cana desviando aproximadamente metade do caldo para a produção direta de álcool enquanto a outra metade é destinada à produção de açúcar. Esse processo em que ambas as matérias-primas, caldo e melaço, são utilizadas pode ser visto no fluxograma simplificado da Figura 4.



**Figura 4** Fluxograma simplificado do processo de produção de açúcar e álcool.

## 2.12 Estudos complementares

Ler o capítulo 2 do livro *Tecnologia de Produção de Açúcar* (LOPES & GABRIEL, 2010).

## 2.13 Considerações finais

Nesta unidade, recapitulamos a produção de açúcar de forma sintetizada, dando ênfase aos pontos críticos do processo. Vimos também as diferentes matérias-primas que podem ser utilizadas para a fabricação alcoólica, suas vantagens e desvantagens. No Brasil é indiscutível o uso da cana-de-açúcar para tal finalidade por meio da fermentação e destilação do caldo de cana diretamente ou do mel residual da fabricação do açúcar. Tem-se trabalhado no meio científico buscando-se alternativas biológicas de degradação do bagaço da cana e posterior produção de etanol, embora o fim desse resíduo seja a geração de energia para movimentar a indústria canavieira.

# **UNIDADE 3**

Tratamento de caldo e fermentação do mosto



### 3.1 Primeiras palavras

Como já visto na unidade anterior, a maioria das indústrias que processam a cana produz tanto o açúcar quanto o álcool. O álcool é produzido pelo processamento do caldo de cana procedente do processo de extração e também pelo mel residual da fabricação do açúcar.

O tratamento do caldo de cana é um passo determinante na qualidade da fermentação e posteriormente no produto final.

### 3.2 Problematizando o tema

O tratamento dado ao caldo depende do uso que se irá fazer dele, podendo ser mais ou menos rigoroso. Visa primeiramente a eliminação de impurezas grosseiras, como o bagacilho ou a areia, eliminação de partículas coloidais e a minimização da contaminação microbiana.

Atualmente, cerca de metade do caldo de cana processado pelas usinas de açúcar é destinada à produção de álcool. Esse caldo de uso direto para a produção de álcool também necessita de tratamento antes de ser fermentado, pois não apresenta características que permitam sua utilização *in natura*.

### 3.3 Tratamento do caldo para a produção de etanol

O caldo proveniente das moendas vem acompanhado de partículas grosseiras em suspensão, como bagacilho, argila e areia, que devem ser retiradas. Para essa limpeza o equipamento utilizado é a peneira, porém há diferentes tipos deste em uso. Após essa etapa é necessário retirar também as partículas solúveis, insolúveis ou mesmo coloidais do caldo de cana.

Após a etapa de extração do caldo, este será preparado para a fermentação por meio de tratamentos físico-químicos, cujos objetivos são a máxima eliminação de não açúcares, eliminação de coloides, a obtenção de um caldo com baixa turbidez, mínima formação de cor, alta taxa de sedimentação, volume mínimo de lodo, baixo teor de cálcio no caldo clarificado<sup>1</sup> e pH adequado. Outro fator também importante dessa preparação é que o processo de Melle-Boinet exige um caldo tratado para recuperar a levedura, e essa recuperação da levedura ou do fermento é a principal característica desse processo. Além disso, o caldo não clarificado pode ocasionar desgastes e entupimentos dos bicos da centrífuga.

1

A clarificação do caldo de cana consiste na aplicação de leite de cal a fim de inibir a inversão da sacarose em glicose e frutose e precipitar as impurezas do caldo.

O tratamento químico do caldo visa principalmente à coagulação, floculação e precipitação das impurezas solúveis e coloidais que são eliminadas por sedimentação. Para evitar a inversão e degradação da sacarose, ainda é necessário corrigir o pH utilizando o leite de cal, numa etapa denominada caleagem ou calagem.

Leveduras autóctones e bactérias estão presentes no caldo *in natura* e são prejudiciais no processo de fermentação, pois podem diminuir o rendimento etanólico, aumentar a acidez e viscosidade do caldo etc. Outro fator agravante são as contaminações com microrganismos do ambiente. Estudos mostram que a competição pelo substrato entre esses microrganismos e as leveduras inoculadas pode reduzir a produção significativamente. Assim, para evitar essas contaminações, vários procedimentos podem ser utilizados para esterilização do meio, como antibióticos, ácidos, temperaturas elevadas, entre outros. Entretanto, todas essas alternativas devem ser muito bem estudadas por um profissional especializado na área para evitar um descontrole e o desenvolvimento, por exemplo, de cepas resistentes de bactérias e leveduras indesejáveis.

No tratamento do caldo, usualmente se utiliza a pasteurização para minimizar a população microbiana contaminante. Para isso, o caldo deve ser aquecido a uma temperatura superior a 80 °C, temperatura mínima para eliminação de microrganismos termófilos, embora alguns autores recomendem um aquecimento até 100 °C, semelhante ao utilizado nas usinas de açúcar.

#### Pasteurização regenerativa

Nesse sistema, o caldo misto é aquecido inicialmente trocando calor com o caldo tratado (sistema regenerativo). Logo após, num trocador de calor que utiliza vapor como agente de aquecimento, a elevação de temperatura é completada. O caldo é então tratado com cal e decantado.

Em seguida, o caldo é resfriado, passando novamente no regenerador, dessa vez, cedendo calor. O resfriamento final é realizado num trocador de calor em que a água fria atua como agente de resfriamento até que a temperatura final atinja aproximadamente 30 °C.



## Evaporação

No início do Proálcool as destilarias foram projetadas para funcionarem com uma pequena evaporação em tríplice efeito para produzir xarope e, assim, melhorar a concentração do mosto. Esse xarope tinha também como objetivo formar um estoque “pulmão” que, nas paradas nas moendas ou na falta de cana, poderia ser diluído e suprir a fermentação.

A maioria das plantas mais modernas e de maior capacidade que foram implantadas recentemente não contempla essa possibilidade. Existe frequentemente um tanque de caldo decantado de maior capacidade para garantir um mínimo estoque para paradas pequenas. Entretanto, hoje em dia se confia muito mais em um suprimento estável de cana e em uma alta disponibilidade mecânica dos equipamentos.

### **3.4 Processos de condução da fermentação**

Existem diferentes processos para a condução da fermentação, como o processo por decantação em que, no final da operação, o vinho é deixado em repouso para que o fermento decante e possa ser utilizado em fermentações subsequentes. Esse processo é bastante utilizado em pequenas destilarias de aguardente de cana.

Tanto produtoras de aguardente com unidades industriais de maior porte quanto pequenas unidades produtoras de álcool utilizam o processo fermentativo de cortes em que o fermento é multiplicado numa dorna. Esse método consiste em repartir o conteúdo da dorna quando aproximadamente metade do açúcar presente se transforma em álcool e ir completando seu volume com mosto. No momento em que as duas dornas atingirem o estágio de metade da fermentação é realizado o corte de seu conteúdo para mais duas dornas e assim, sucessivamente, até todas as dornas estarem em uso. Assim que esse estágio for atingido, deixa-se que as fermentações prossigam até o seu final, em que o vinho resultante será então destilado.

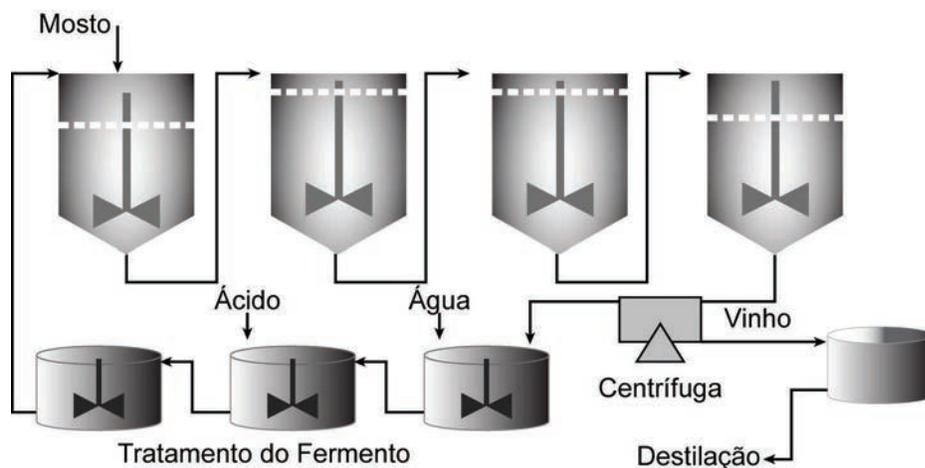
No caso das destilarias de álcool de porte comercial, o processo fermentativo utilizado é o de separação e reutilização do fermento, denominado processo Melle-Boinot de recuperação do fermento.

## Fermentação Melle-Boinot

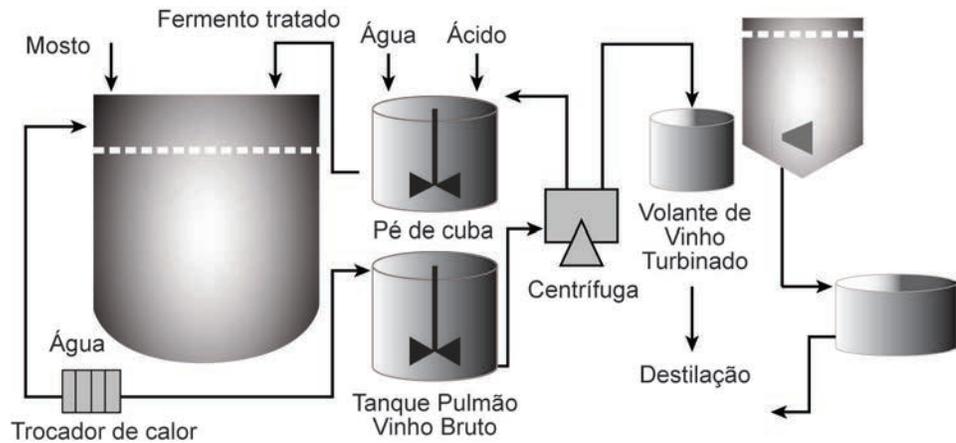
O processo fermentativo Melle-Boinot foi desenvolvido na década de 1930 na França pelo engenheiro Firmin Boinot nas Usines de Melle. Sua principal característica é a recuperação, o tratamento e a reutilização em sucessivas fermentações do fermento. As células de leveduras são separadas do vinho por centrifugação, e o material depositado recebe tratamento químico para ser novamente utilizado. O vinho separado, livre das células de leveduras, é chamado de vinho centrifugado ou vinho delevurado. Após essa etapa, o vinho é finalmente encaminhado para a destilação.

Esse processo mantém um elevado contingente celular, e isso diminui as perdas de sacarose pelas leveduras, que não vão consumir energia em multiplicação celular ou gerar aumento de biomassa.

A fermentação Melle-Boinot pode ser de forma contínua, em que o mosto é misturado ao fermento na primeira dorna e será reaproveitado para as demais dornas num processo contínuo até chegar à última dorna. Nesta, a concentração de açúcares praticamente já se esgotou e é chamada de dorna morta. O vinho bruto dessa última dorna é centrifugado e segue para destilação, que pode ser descontínua ou batelada. A diferença desta para a fermentação contínua é que a alimentação é realizada no início da operação e o material processado é retirado em sua totalidade no final, passando pelas etapas de separação e tratamento antes do reaproveitamento. A descrição dos dois processos pode ser vista nas Figuras 6 e 7.



**Figura 6** Fluxograma do processo Melle-Boinot operando em fermentação contínua.



**Figura 7** Fluxograma do processo Melle-Boinot operando em fermentação em bateladas.

### Balanco de massa de uma fermentação

Balanco de massa é um dos pré-requisitos indispensáveis para resolver problemas dos processos industriais. Consiste no resultado da aplicação da lei da conservação da matéria em um sistema, enunciada pelo químico francês Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), que diz: na natureza nada se perde, nada se cria, tudo se transforma. Assim, em um sistema em que uma indústria de vinho fermenta 100 kg/h de um mosto com 15% p/p (por cento em peso) de Açúcares Redutores Totais (ART), produzindo um vinho com 6,8% de álcool, qual seria o rendimento dessa fermentação?

Pela reação química anterior, tem-se que 1 mol de açúcar gera 2 moles de álcool etílico, ou seja, 180g de açúcar geram 92g de álcool. Assim o mosto, com 15% de açúcar em peso, geraria pelos cálculos estequiométricos:

$$\frac{15 \cdot 92}{180} = 7,7\% \text{ de etanol}$$

Ora, estequiometricamente a fermentação deveria resultar num vinho com 7,7% de álcool, mas apresentou 6,8% de concentração final, ou seja, na prática o álcool gerado foi menor que o previsto teoricamente. O rendimento da fermentação conhecido como rendimento teórico ou estequiométrico é a relação entre os dois valores expressos em porcentagem.

### 3.5 Balanco de massa de uma dorna

Dornas fermentativas são reservatórios cilíndricos construídos em aço carbono com capacidade variável de acordo com a produção desejada. Atuam como

reator bioquímico em que ocorre a fermentação, transformando os açúcares em álcool e em outros subprodutos como glicerol, óleo fúsel, dióxido de carbono, ácido acético etc., pela ação das leveduras.

Para fins de balanço de massa de uma dorna operando pelo processo fermentativo Melle-Boinot, consideramos que os materiais que entram nesse processo são o mosto (M) e o pé de cuba<sup>2</sup> (P), e os materiais que saem do processo são o vinho (V) e o dióxido de carbono (C), conforme o esquema da Figura 8. Isso nos permite elaborar a seguinte equação geral de balanço:

$$M + P = V + C$$

Podemos também realizar um balanço geral de álcool, considerando que a quantidade total de álcool gerado pela fermentação do mosto é igual ao produto do álcool possível de ser gerado segundo a equação estequiométrica da fermentação pelo rendimento da fermentação expresso em fração decimal:

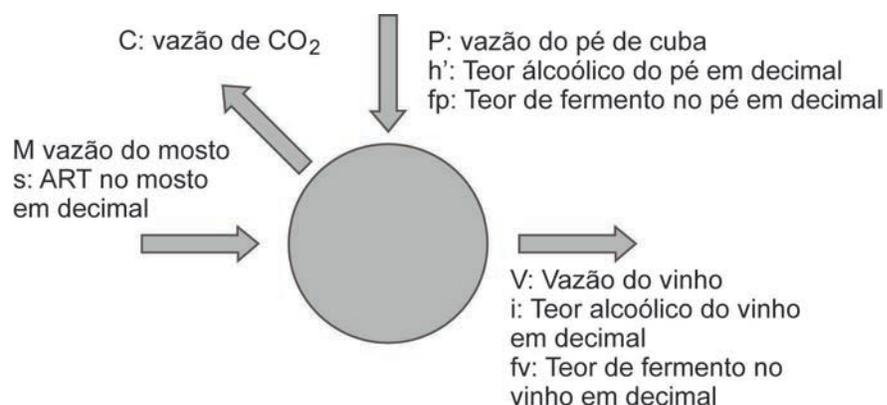
$$\text{total de álcool gerado na fermentação} = 0,64 \cdot R \cdot M \cdot s$$

em que:

- R: rendimento da fermentação em decimal;
- s: teor de ART no mosto em decimal.

Dessa forma podemos elaborar a seguinte equação geral:

$$0,64 \cdot R \cdot M \cdot s + P \cdot h' = V \cdot i$$



**Figura 8** Balanço de massa de uma dorna de fermentação.

Pode-se também fazer um balanço de massa do fermento, partindo do princípio de que não ocorre multiplicação durante a fermentação, o que nos permite escrever:

$$P \cdot f_p = V \cdot f_v$$

### 3.6 Balanço de massa da centrifugação do vinho

Como já foi visto, o objetivo da operação de centrifugação é a separação do fermento do vinho. O fermento recuperado chamado de leite de levedura sofre um tratamento e é então reutilizado. Isso consiste a essência do processo Melle-Boinot.

A adequada operação das centrífugas precisa ser feita controlando-se variáveis como a vazão, a pressão, o diâmetro dos bicos da centrífuga e a concentração do leite de leveduras, o número de centrífugas adequadas, entre outras. Da mesma forma, é necessário atentar para a assepsia das centrífugas, pois pode haver incrustações nos pratos e bicos, entupindo-os, diminuindo a eficiência e o rendimento na usina.

Na Figura 9 consta uma representação da operação de centrifugação com as indicações dos fluxos de material, de modo que podemos escrever a equação geral:

$$V = E + T$$

A relação entre a vazão do fermento e do vinho, ou seja,  $r = \frac{F}{V}$ , é um parâmetro importante na operação de centrifugação, que seria a fração decimal da vazão do leite em relação à vazão do vinho. Essa relação pode ser expressa sob a forma:

$$F = r \cdot V$$

Substituindo essa equação na equação geral de fluxo, tem-se:

$$V = r \cdot V + T$$

Ou

$$T = V \cdot (1 - r)$$

Seguindo a mesma sistemática, pode-se fazer um balanço geral de álcool, como segue:

$$V \cdot i = T \cdot g + F \cdot h$$

em que

- i: teor alcoólico do vinho;
- g: teor alcoólico do vinho centrifugado;
- h: teor alcoólico do fermento.

Um balanço geral do fermento seria:

$$V \cdot f_V = F \cdot f_F + T \cdot f_T$$

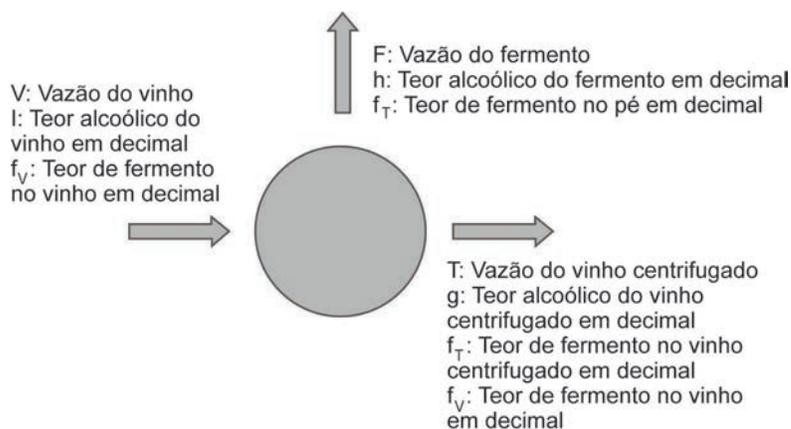
em que

- $f_V$ : teor de fermento no vinho;
- $f_F$ : teor de fermento no leite de levedura;
- $f_T$ : teor de fermento no vinho turbinado.

Considerando que o teor de fermento no vinho centrifugado é muito pequeno em relação a sua concentração no fermento, podemos simplificar da seguinte maneira:

$$V \cdot f_V = F \cdot f_F$$

$$\frac{F}{V} = \frac{f_V}{f_F} = r$$



**Figura 9** Balanço de massa de uma centrífuga de vinho.

## Balanço de massa da cuba de pré-fermentação

A cuba de pré-fermentação ou pré-fermentador é o equipamento em que o leite de levedura é diluído, em geral, com uma ou duas partes de água e a adição de ácido sulfúrico. A função da cuba é tratar o fermento e também servir como local de sua multiplicação. Para essa finalidade, muitas cubas dispõem de equipamento de aeração.

O pré-fermentador geralmente apresenta um volume igual a 30% do volume das dornas, mas alguns projetistas citam até cerca de 40% para que se tenha um volume que permita a reativação do fermento após as paradas. O balanço geral desse equipamento, conforme o esquema da Figura 10, é:

$$P = F + A$$

Como o volume de água adicionado é uma função da vazão de fermento, ou seja,  $A = d \cdot F$ , em que  $d$  é a razão de água em relação ao fermento, podemos escrever:

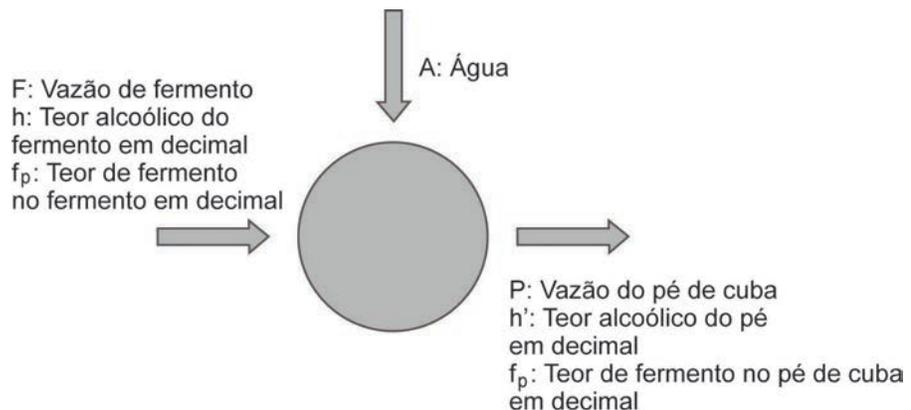
$$P = F + d \cdot F \text{ ou } P = F \cdot (1 + d)$$

A equação de balanço do componente álcool é:

$$F \cdot h = P \cdot h'$$

Caso não se considere a ocorrência de multiplicação de fermento na cuba, podemos escrever a equação de balanço desse componente:

$$F \cdot f_F = P \cdot f_P$$



**Figura 10** Balanço de massa da cuba de pré-fermentação.

## Rendimento da fermentação

O rendimento da fermentação teve muitas denominações e procedimentos para seu cálculo, mas atualmente as unidades produtoras têm adotado o rendimento teórico de Gay Lussac ou estequiométrico, que corresponde à relação entre o álcool efetivamente produzido na fermentação e aquele que teoricamente poderia ser gerado segundo a reação química de transformação de açúcar em álcool:

$$\text{Rendimento (R)} = 100 \cdot \frac{\text{Álcool etílico gerado na fermentação}}{\text{Álcool teórico possível de ser gerado pela equação estequiométrica}}$$

A relação que expressa o rendimento da fermentação pode ser expressa algebricamente da seguinte maneira:

$$R = 100 \cdot \frac{T \cdot g}{0,64 \cdot M \cdot s}$$

O rendimento pode também ser calculado em função da equação geral de balanço de massa, em que o valor de R é explicitado, resultando numa expressão denominada cálculo indireto:

$$R = 100 \cdot \frac{i \cdot V - h' \cdot P}{0,64 \cdot M \cdot s}$$

$$(0,64 \cdot R \cdot M \cdot s) + P \cdot h' = V \cdot i$$

### 3.7 Considerações finais

O tratamento do caldo influencia diretamente o rendimento na indústria. É realizado tanto fisicamente, para retirada de impurezas carreadas com os colmos de cana, quanto quimicamente, a fim de se otimizar o caldo para posterior fermentação.

Nesta unidade, discutiu-se também a fermentação Melle-Boinot, a mais utilizada no país. Nela o tratamento do caldo é realizado segundo as etapas descritas, minimizando o aporte de microrganismos indesejáveis; além do tratamento no caldo é realizado também um tratamento do fermento antes deste ser reutilizado.



# **UNIDADE 4**

Fermentação do mosto: aspectos de dimensionamento



## 4.1 Primeiras palavras

A fermentação alcoólica nas indústrias ocorre fundamentalmente no interior de biorreatores denominados de dornas de fermentação. Neles, processos bioquímicos envolvendo microrganismos degradam a sacarose presente no mosto, produzindo álcool, bióxido de carbono e outros compostos em menores quantidades.

## 4.2 Problematizando o tema

A eficiência desse bioprocessos está relacionada à qualidade nutricional e físico-química do meio em que está sendo realizado, bem como da temperatura, do pH e da concentração de substrato. Projetar adequadamente essas variáveis e controlá-las permite, desse modo, aperfeiçoar a produção de etanol pelas leveduras presentes.

## 4.3 Introdução

Como dito anteriormente, o processo mais utilizado no Brasil para produção etanólica nas destilarias é o Melle-Boinot, caracterizado pela recuperação do fermento por meio da centrifugação do vinho e sua posterior reutilização em fermentações sucessivas.

Simplificando o processo, pode-se dizer que o caldo de cana aquecido (até 100 °C) e clarificado é resfriado a uma temperatura em torno de 30 °C, considerada adequada para o desenvolvimento das leveduras. Essa operação é realizada por trocadores de calor, e o mosto é então encaminhado para as dornas de fermentação, onde se encontra o pé de cuba oriundo da pré-fermentação.

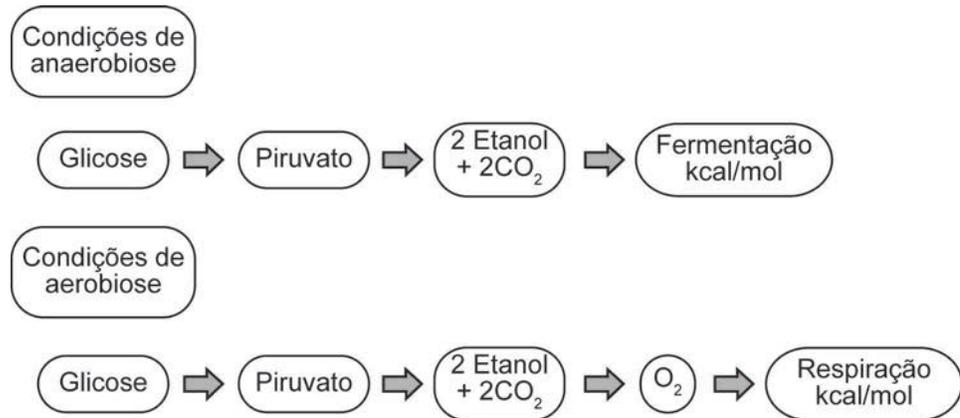
Considerando que o tempo de alimentação da dorna influencia a eficiência desse bioprocessos, deve-se realizá-lo sob vazão tal que o enchimento dela ocorra dentro de quatro a cinco horas. À medida que se inicia a alimentação da dorna com o mosto, também se inicia a fermentação propriamente dita. Finalizada essa etapa, a fermentação ainda continuará por algumas horas até que todos os açúcares presentes sejam convertidos em álcool e subprodutos. Normalmente o tempo gasto é de quatro a sete horas, quando então a dorna é “morta”.

Ao final da fermentação o produto gerado é denominado vinho ou vinho bruto, que é bombeado por tubulação apropriada para as centrífugas separadoras de fermento de onde, com a denominação de vinho delevurado, é encaminhado às dornas volantes.

O vinho de levedurado (centrifugado) é enviado às colunas de destilação, enquanto o leite de leveduras vai para a cuba de tratamento. O processo de tratamento ácido do leite de levedura, às vezes chamado de pré-fermentação, varia bastante conforme a unidade produtora. Esse tratamento consiste basicamente em se baixar o pH para 2,0 ou 3,0 com a adição de ácido sulfúrico e diluição (ou lavagem) do meio com água. O pH ácido inibe a multiplicação de bactérias contaminantes do processo, mas em algumas destilarias ainda se adiciona antibiótico para garantir menor contaminação bacteriana. Em seguida o fermento tratado vai para a cuba de descanso, onde permanece por duas a três horas, e depois para as dornas de fermentação. O rendimento associado a esse processo está em torno de 85% a 90%, para a maioria dos casos.

#### 4.4 Vias metabólicas e balanço energético da fermentação

Na via glicolítica, a hexose é utilizada como fonte energética para desenvolvimento de biomassa e produção de álcool, existindo assim duas vias distintas (ver Figura 11). Na primeira, o objetivo é a multiplicação celular (aumento de biomassa), e na segunda, a fermentação (para produção de álcool). A conversão da glicose (ART) em etanol é regida segundo os princípios da termodinâmica. Na fermentação de 42 kcal/mol gera-se 16 kcal/mol de energia útil enquanto 26 kcal/mol são perdidos.



**Figura 11** Vias metabólicas da fermentação alcoólica.

Em função dos valores citados, conclui-se que apenas 7% (100 menos 93) da energia da glicose foi disponibilizada para a levedura durante a fermentação. Ainda, parte dessa energia foi utilizada para a produção de ATP (empregada na formação de biomassa e energia de manutenção), e a restante foi dissipada como calor. Em razão desse valor, a produção de combustível pela via glicolítica é muito interessante.

Ensaio de laboratório e dados de unidades industriais mostram uma ampla faixa de rendimento em etanol (fração do açúcar metabolizado que foi transformado em etanol), considerando a conversão de 100g de ART em 51,11g de etanol pela via glicolítica. No entanto, a dificuldade de se medir os volumes nos processos industriais, bem como a utilização de diferentes metodologias nos diversos laboratórios contribuem para valores não realistas e de difícil comparação. A estimativa do rendimento mediante a formação de subprodutos da fermentação (biomassa, glicerol, ácidos orgânicos/acidez), embora de utilidade para o monitoramento do processo industrial, incorre em extrapolações comprometedoras. Todos os produtos da fermentação competem entre si pela mesma fonte de carbono, o açúcar, e a produção de alguns afeta a formação dos demais.

## 4.5 Dimensionamento das dornas

O volume das dornas deve ser suficiente para gerar uma determinada vazão de álcool, conforme o que foi projetado. Um parâmetro para esse cálculo é o ciclo de fermentação completo, que consiste em:

- a) tempo de alimentação da dorna;
- b) tempo de fermentação;
- c) tempo de pós-fermentação (tempo de turbinagem, limpeza e alimentação do pé).

No cálculo do volume das dornas deve ser previsto um adicional para compensar a perda de volume por espuma, gás preso (*hold-up*) e pelos acessórios internos como a serpentina de resfriamento. Esse excedente de volume em geral se considera como sendo de 5%, ou seja, 95% da dorna é aproveitável. Considerando o teor alcoólico do vinho turbinado como sendo  $E_T$ , o volume desse vinho por  $m^3$  de álcool produzido será  $100/E_T$ . Para um valor de  $E_T$  igual a 7,5 °GL teremos:

$$\frac{100}{7,5} = 13,3 \text{ m}^3 \text{ por m}^3 \text{ de álcool}$$

Considerando que uma fração ( $m$ ) do vinho gerado nas dornas é separada sob a forma de leite de levedura nas centrifugas, podemos concluir que o volume gerado ( $V$ ) nas dornas será de:

$$V = \frac{T}{1-m}$$

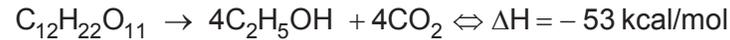
Considerando que a fração de leite de levedura separada nas centrifugas está em torno de 10% ou  $m = 0,1$ , teremos:

$$V = \frac{100}{E_T(1-m)9}$$

$$V = \frac{100}{7,5(1-0,1)} = 14,8 \text{ m}^3 \text{ de vinho/m}^3 \text{ de álcool}$$

## 4.6 Refrigeração de dornas

Como vimos, a transformação da hexose (glicose e frutose) em álcool é uma reação exotérmica, de acordo com a equação a seguir:



Por essa equação podemos calcular que ocorre a liberação de 292,9kcal por kg de etanol formado ou 231,1kcal por litro de etanol (densidade de 0,789 kg/litro).

Podemos calcular também que se geram 149,7kcal por kg de ART consumidos, exceto em dornas de tamanho muito pequeno em que o calor gerado é eliminado naturalmente.

Para volumes maiores, como nas destilarias, é necessário um equipamento para retirada de calor, por exemplo, um trocador de calor. Caso a retirada do calor gerado não seja realizada, a temperatura da dorna pode elevar, prejudicando os microrganismos e levando-as a morte celular. Além disso, a evaporação do álcool será aumentada. Essa quantidade de calor a ser retirado é definida por um balanço entálpico da dorna.

Podemos considerar que o calor gerado numa fermentação é de 150 kcal por kg de ART disponibilizados (COPERSUCAR, 2002). Esse calor apresenta dois destinos:

- a) Uma fração dele será perdida para o meio ambiente pelos processos evaporativos e convectivos.
- b) O restante será destinado para elevar a temperatura do mosto ou retirado pelo sistema de troca térmica.

Estimando as perdas de calor ao redor de 10%, ou seja, do calor gerado no processo fermentativo, 90% permanece na dorna, temos:

- Calor restante =  $0.90 \cdot (\text{kg de ART}) \cdot 150$
- Considerando uma dorna de  $500 \text{ m}^3$ , que tenha sido alimentada com  $50.000 \text{ kg}$  de ART, o calor será:

$$0,90 \cdot 50.000 \cdot 150 = 6.750.000 \text{ kcal}$$

Uma parte do calor gerado na fermentação será utilizada para aquecer o mosto ( $Q_A$ ) de sua temperatura original ( $t_i$ ) até a temperatura final ( $t_f$ ), calculado como:

$$Q_A = mc(t_f - t_i)$$

em que

- m: massa de mosto em kg;
- c: calor específico do caldo em kcal/kg °C.

Considerando que o mosto no interior da dorna de  $500 \text{ m}^3$  ( $\cong 500.000\text{kg}$ ) apresenta uma temperatura de  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ , cujo aquecimento não deve superar a  $33 \text{ }^\circ\text{C}$ , e ainda que o calor específico do mosto seja de  $0,86 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$ , podemos calcular o calor gasto nesse aquecimento como:

$$Q_A = 5 \cdot 10^5 \cdot 0,86 \cdot (33 - 26) = 3.010.000 \text{ kcal}$$

No exemplo, do total de calor gerado e não perdido por irradiação e convecção ao longo do processo, ou seja,  $6.750.000 \text{ kcal}$ , a quantidade de  $3.010.000 \text{ kcal}$  é utilizada para aquecimento do vinho na dorna, restando:

$$6.750.000 - 3.010.000 = 3.740.000 \text{ kcal a ser retirado pelo trocador de calor.}$$

Considerando um tempo de fermentação de 8 horas, a taxa de retirada horária de calor será de:

$$3.740.000 / 8 = 468.500 \text{ cal/h}$$

Para fins de dimensionamento dos trocadores de calor, é recomendado que se selecione um trocador de calor com o dobro da capacidade de retirada de calor que a calculada, ou seja, para o exemplo, seria de  $2 \cdot 468.500 = 935.000 \text{ kcal/h}$ .

## 4.7 Cálculo de um trocador de calor

O cálculo de um trocador de calor é realizado partindo da equação geral de troca térmica:

$$Q = K \cdot S \cdot \Delta t_{ml}$$

em que

- Q: calor a ser retirado em kcal/h;
- K: coeficiente global de troca térmica em kcal/hm<sup>2</sup> °C;
- $\Delta t_{ml}$ : diferença média logarítmica da temperatura.

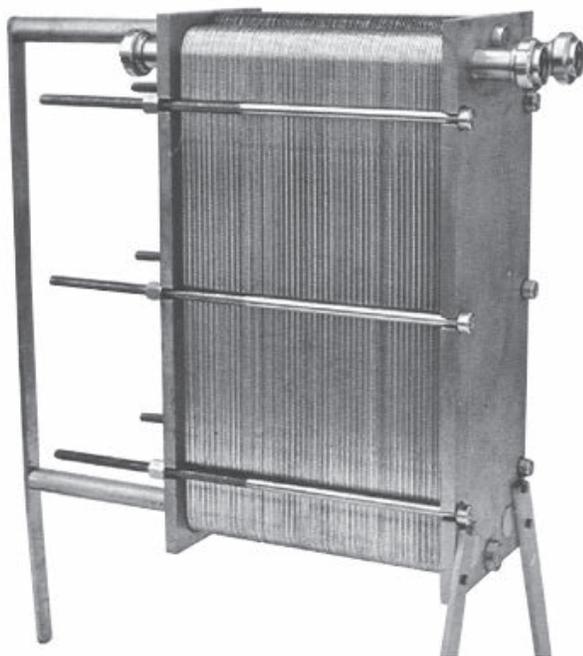
O cálculo da superfície de troca térmica do trocador de calor pode então ser realizado pela expressão em que o termo S foi explicitado:

$$S = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{ml}}$$

Exemplo: Considerando o valor calculado da quantidade de calor a ser retirada de 935.000 kcal/h, e que será utilizado um trocador de calor de placas (ver Figura 12), cujo coeficiente global de troca térmica K é de 3.100 kcal/hm<sup>2</sup> °C e um  $\Delta t_{ml}$  de 4 °C, temos:

$$S = Q/K \cdot \Delta t_{ml} = 935.000/3.100 \cdot 4$$

$$S = 75,4 \text{ m}^2 \text{ de superfície de troca térmica}$$



**Figura 12** Trocador de calor de placas (ALFA-LAVAL).

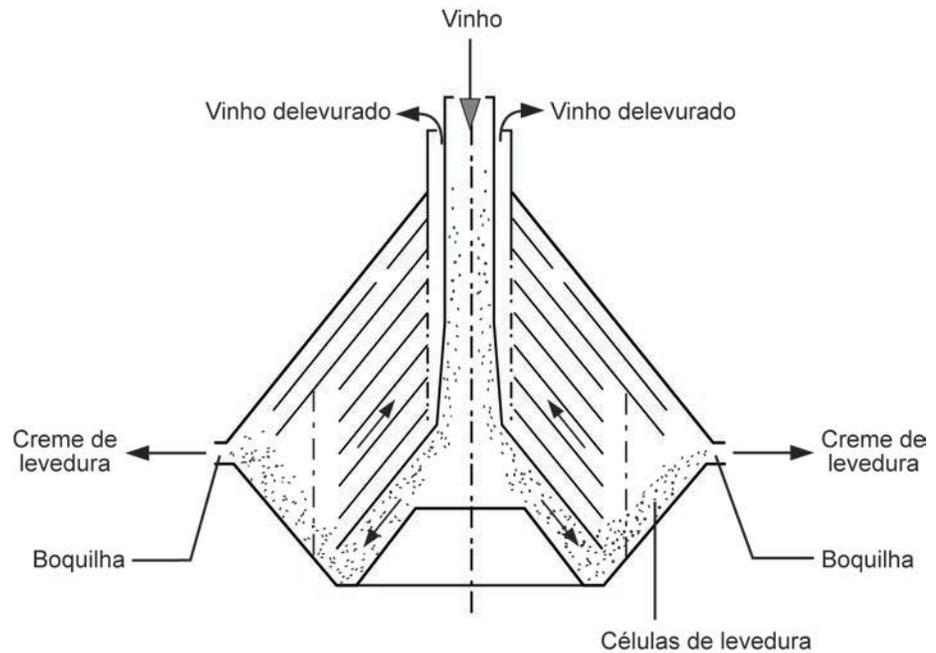
## 4.8 Centrífuga de vinho

Após o término do processo fermentativo, as células de levedura do vinho devem ser separadas para a reutilização em fermentações subsequentes. A recuperação dessas células chamadas de fermento é realizada mediante uma centrifugação aproveitando a diferença de densidade entre o fermento e a fase contínua que é o mosto.

Originalmente, a separação de um sólido suspenso num meio líquido era feita pela ação da gravidade. No líquido em repouso, o fermento que é mais denso se sedimenta. A separação por gravidade tem como problema o tempo excessivo, pois é prejudicial ao vinho, mas para a sedimentação ele é necessário, especialmente se a diferença de densidade entre o líquido e as células não for muito grande para garantir essa separação do fermento do sobrenadante ou vinho. A alternativa para aumentar a velocidade de sedimentação das células de levedura foi desenvolvida por Gustaf de Laval e consiste em elevar por centenas de vezes essa velocidade pelo uso da força centrífuga.

Todo corpo ao realizar um movimento circular origina uma força centrífuga na direção da reta que une o corpo ao centro de curvatura da trajetória do corpo. A quantidade de vezes em que a força centrífuga gerada supera a força de gravidade é conhecida como G ou também como fator de separação da centrífuga. As centrífugas de vinho consistem num rotor com orifícios em sua periferia

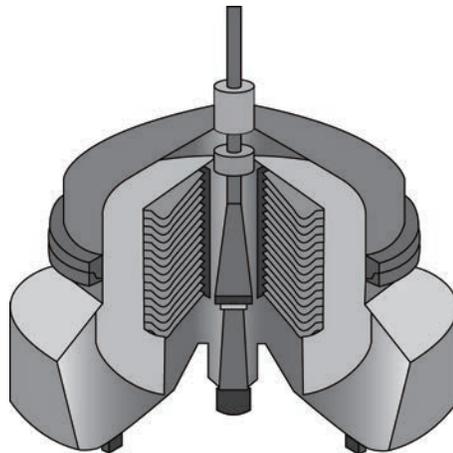
chamados de boquilhas, por onde sai o fermento (sólidos). O vinho é alimentado continuamente pela parte central do cone, e o fermento é retirado pela periferia sob a forma de um creme, conforme mostra a figura a seguir.



**Figura 13** Rotor de uma centrífuga de vinho

Fonte: Lopes (1986).

O rotor é acionado por motor elétrico e dispõe de 12 boquilhas distribuídas ao longo de sua periferia. As centrífugas são classificadas pela sua capacidade média de processamento de vinho expressa em litros ou  $m^3$  por hora. O rotor encontra-se no interior de uma carcaça fechada que atua como coletor do creme de fermento, conforme pode ser visto na figura a seguir.



**Figura 14** Vista do rotor da centrífuga envolto pela carcaça.

Fonte: Lopes (1986).

A centrífuga processa o vinho com um certo teor de fermento, por exemplo 8%, e produz um creme de levedura com 50% de fermento e um vinho delevurado (sem levedura) com menos de 0,5% de fermento.



**Figura 15** Vista de uma centrífuga instalada e em operação.

## 4.9 Tratamento do fermento pré-fermentador

O pré-fermentador ou cuba de pré-fermentação tem como principal função o tratamento do fermento separado na centrífuga antes de sua utilização em fermentação subsequente. A cuba tem também a função de reativar o fermento após o tratamento ácido.

As cubas são utilizadas tanto no processo fermentativo contínuo como no descontínuo. Nas fermentações contínuas, pode-se operar com somente uma cuba, e nas fermentações descontínuas com no mínimo três. Por convenção, o volume da cuba deve ser em torno da terça parte do volume da dorna ou ao redor de 30%. Alguns autores recomendam um volume maior, ao redor de 40%, a fim de se ter uma margem de segurança devido ao volume perdido por espuma ou gás preso (*hold-up*).

O tratamento do fermento ou leite de levedura consiste em diluí-lo em uma ou duas partes de água até que a concentração de fermento que inicialmente era de 50% seja reduzida para 15% a 20%. O tratamento do fermento consiste também na redução do pH do leite de levedura pela adição de ácido sulfúrico que atua como bactericida. Assim, o líquido tratado, denominado de pé de cuba, pode ser deixado em repouso por um tempo variável, de 1 a 3 horas, antes de ser utilizado em fermentação subsequente.

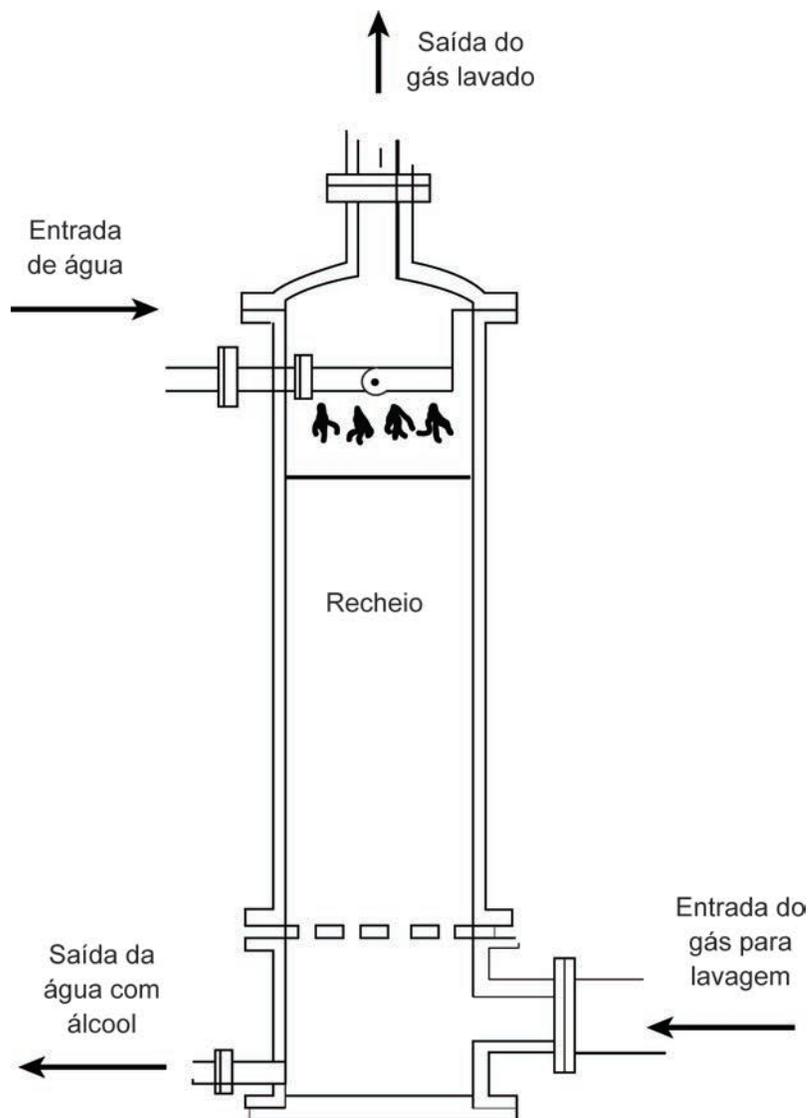
Dorna volante

O vinho centrifugado ou delevurado é enviado para um tanque “pulmão”, cujas dimensões são semelhantes às de uma dorna e que recebe o nome de dorna volante. Dessa dorna o vinho é então bombeado para a coluna de destilação.

#### **4.10 Lavadores de gás**

Durante o processo fermentativo, 51% dos carboidratos se transformam em álcool e o restante em  $\text{CO}_2$  que se desprende do vinho e se perde na atmosfera. Esses gases costumam arrastar consigo uma porção de álcool que, dependendo da temperatura da fermentação, pode chegar até a 2% do total gerado.

Para evitar essas perdas, as dornas de fermentação devem ser fechadas, e o gás  $\text{CO}_2$  é “lavado” antes de ser dissipado na atmosfera. O lavador de gás tem a função de realizar contato entre a água e o  $\text{CO}_2$ . Para que isso ocorra, geralmente é utilizada uma coluna de enchimento. O enchimento da coluna aumenta o trajeto do gás e forma um filme líquido com uma grande área em que ocorre a absorção.



**Figura 16** Coluna lavadora do bióxido de carbono das dornas.

A coluna é alimentada com água pela parte superior por meio de aspersores, e o líquido desce atravessando um leito recheado com anéis do tipo rasching. O gás proveniente das dornas é encaminhado para a parte inferior da coluna onde sobe atravessando o leito de recheio em contracorrente com a água que desce. Dessa forma, o álcool presente nos gases se transfere para o líquido sendo então enviado novamente à dorna para recuperação.

#### 4.11 Considerações finais

O dimensionamento das dornas é um ponto crítico que deve ser bem analisado durante a etapa de desenvolvimento do projeto. Fatores como “quanto a indústria vai processar”, “em que sistema (contínuo ou descontínuo)”, entre outros, devem ser levados em consideração, pois influenciarão o funcionamento das dornas. Será necessário realizar o resfriamento das dornas e, para isso,

normalmente é necessário instalar um trocador de calor com alta capacidade, e este depende da vazão de fluidos quentes e frios que estão circulando, da temperatura desses fluidos, do calor específico do líquido etc. O tratamento físico-químico no leite de leveduras é feito pelo monitoramento deste, desde sua vazão que eflui das centrifugas, pois isso permite um melhor cálculo das doses de antibióticos e nutrientes. Ao mesmo tempo também são registradas periodicamente as variações de temperatura por meio de sensores. Esse parâmetro é fundamental, pois interfere sobremaneira no ciclo de vida microbiana, podendo causar a morte precoce do fermento.

# UNIDADE 5

Destilação do etanol



## 5.1 Primeiras palavras

O processo de destilação foi introduzido na Europa Ocidental pelos árabes no norte da África. Na época, a técnica despertou o interesse dos alquimistas e dos monges. O termo destilação corresponde à separação das substâncias voláteis presentes no vinho por evaporação seguida de sua condensação.

## 5.2 Aspectos gerais

Na fermentação do tipo Melle-Boinot em que a levedura é separada por centrifugação e depois recuperada, o produto é o vinho centrifugado ou delevurado, que apresenta um teor alcoólico entre 7 a 10 °GL. Inicialmente esse vinho é encaminhado a um reservatório “pulmão” de capacidade semelhante à das dornas. Esse reservatório é denominado de dorna volante e atua como regulador de fluxo.

A etapa seguinte no processo de produção do álcool consiste em elevar a concentração alcoólica do vinho até valores superiores a 90 °GL, ao redor de 96 °GL se o objetivo é a obtenção do denominado álcool hidratado, ou valores superiores a 99 °GL se for o álcool anidro. Durante a fermentação são produzidos, além do etanol, outros álcoois homólogos de três, quatro e cinco carbonos, aldeídos, ésteres etc., que são designados como componentes secundários. Para se otimizar a produção de etanol exclusivamente é necessária a retirada desses componentes numa operação denominada de retificação.

O princípio da destilação baseia-se na diferença entre o ponto de ebulição da água (100 °C) e do álcool (78,4 °C). A mistura de água e álcool apresenta ponto de ebulição variável em função do grau alcoólico. Assim, o ponto de ebulição de uma solução hidroalcoólica é intermediário entre o ponto da água e o do álcool e será tanto mais próximo deste último quanto maior for o grau alcoólico da solução.

Resumindo, os objetivos da destilação são:

- a) concentrar o álcool etílico do vinho para produção de bebida alcoólica, cujo teor se situa na faixa de 40 °GL a 50 °GL;
- b) produzir álcool hidratado com 96 °GL;
- c) separar os componentes secundários do álcool como o metanol, n-propanol, álcoois amílicos etc., no processo de retificação.

Todo material volátil, como o nome indica, emite vapor, ou seja, apresenta uma pressão de vapor, cujo valor aumenta com a temperatura. Na temperatura

na qual o líquido volátil apresenta uma pressão de vapor igual a da atmosfera, diz-se que ele atingiu a sua temperatura de ebulição. Na Tabela 1 a seguir são apresentados os valores da pressão de vapor da água e do álcool etílico em diferentes temperaturas.

**Tabela 1** Pressão de vapor da água e do álcool etílico em diferentes temperaturas.

Temperatura °C	Água	Etanol
20	17,4	43,8
40	54,9	140,0
50	91,9	221,5
78,5	**	760,0
90	525,4	**
100	760,0	**

As primeiras determinações da pressão de vapor de líquidos voláteis foram realizadas utilizando um barômetro de mercúrio no qual o líquido era introduzido e ao atingir a câmara de vácuo superior vaporizava, provocando um abaixamento da coluna de mercúrio. Quantidades sucessivas de líquido são introduzidas até que se atinja uma situação tal que qualquer líquido adicional não passe ao estado vapor, permanecendo no estado líquido em equilíbrio com o estado vapor. O abaixamento da coluna de mercúrio até ser alcançado o equilíbrio corresponde à pressão de vapor a temperatura da experiência.

Existe uma correlação entre a pressão de vapor de um líquido e sua temperatura, como mostra a equação de Antoine a seguir:

$$\log_{10} P_v = A - \frac{B}{t + C}$$

em que:

- $P_v$ : pressão de vapor em mmHg;
- $T$ : temperatura em °C;
- $A$ ,  $B$  e  $C$ : parâmetros que dependem da natureza do líquido.

Para o etanol os parâmetros são:

- $A$ : 8,11;
- $B$ : 1592,86;
- $C$ : 226,18.

A volatilidade dos líquidos é diretamente proporcional a sua pressão de vapor, ou seja, quanto maior a pressão de vapor, maior é a volatilidade, que é inversamente proporcional a sua temperatura de ebulição. Assim, quanto menor a temperatura de ebulição, maior é sua volatilidade.

A volatilidade relativa de um componente de mistura de líquidos voláteis corresponde à relação entre suas concentrações na fase vapor e na fase líquida, e é chamada de quociente de equilíbrio:

$$k = \frac{Y}{X}$$

$$Y = k \cdot X$$

em que:

- Y: fração molar de um componente na fase vapor;
- X: fração molar de um componente na fase líquida;
- k: quociente de equilíbrio.

Para o caso de uma mistura binária formada pelos componentes A e B, a volatilidade relativa do componente A pode ser escrita da seguinte forma:

$$k_A = \frac{Y_A}{X_A}$$

e a volatilidade relativa do componente B:

$$k_B = \frac{Y_B}{X_B}$$

Para uma mistura de dois componentes, cumpre-se o balanço de massa:

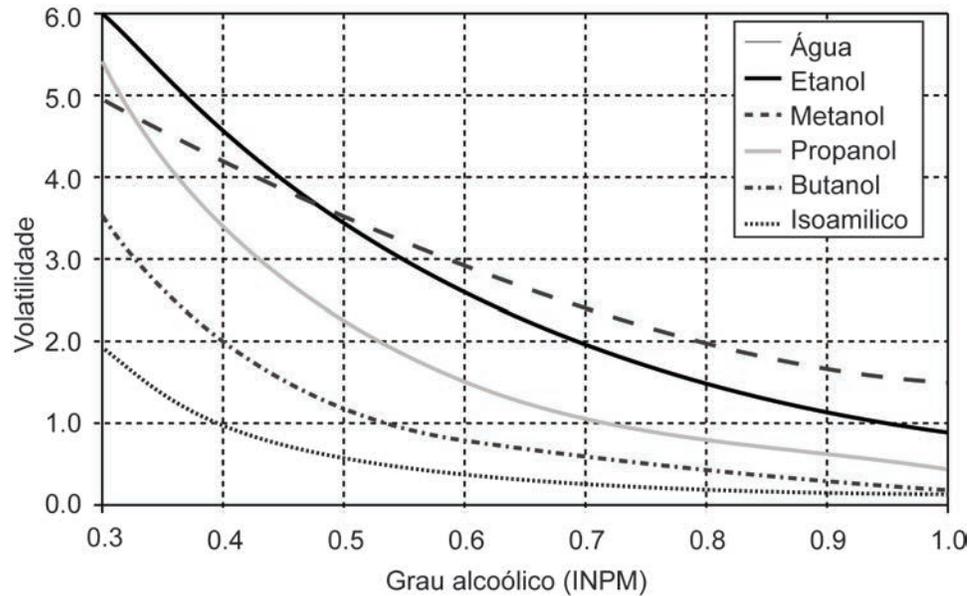
$$X_A + X_B = 1$$

$$Y_A + Y_B = 1$$

Como exemplo de aplicação desses conceitos, vamos considerar uma mistura de etanol e água, cujo calor de  $k$  é 1,1 e a fração molar do álcool na fase líquida é 0,52. Qual a sua fração molar na fase vapor?

$$Y = 1,1 \cdot 0,52 = 0,58$$

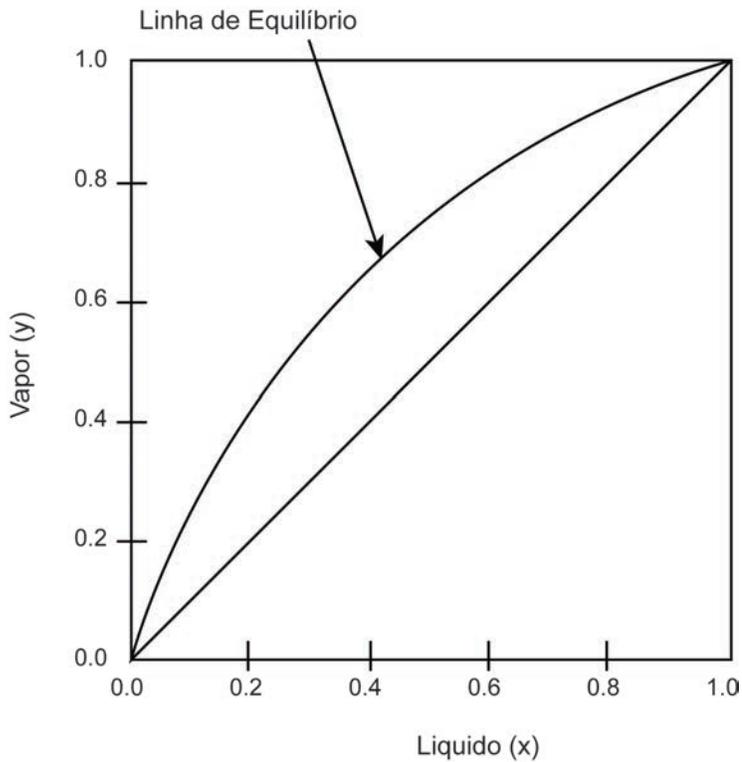
A volatilidade de diversos álcoois em relação à água pode ser vista no Gráfico 9.



**Gráfico 9** Volatilidade de diversos álcoois em relação à água.

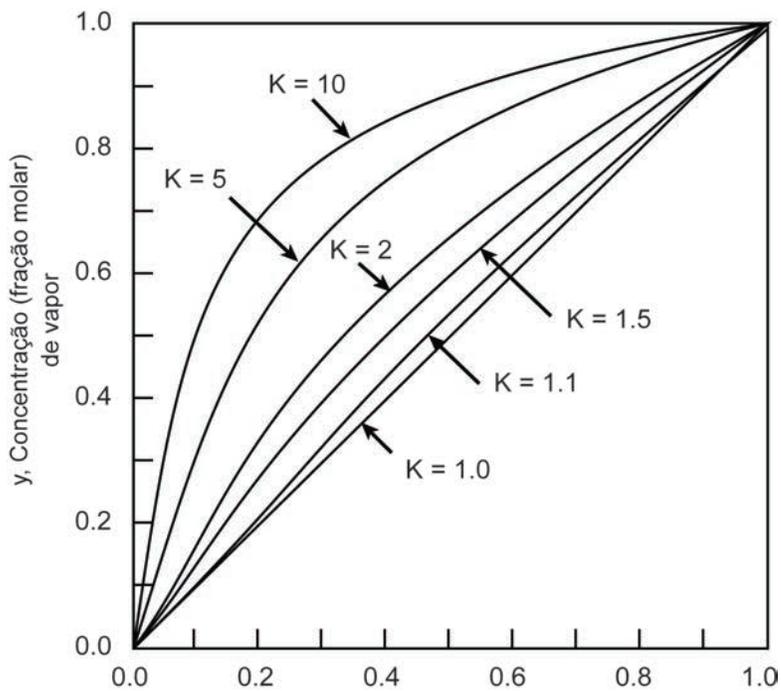
### 5.3 Gráfico da composição líquido/vapor

A composição da fase vapor para misturas binárias de componentes voláteis pode ser apresentada sob a forma de uma curva em que, para cada concentração da fase líquida, teremos a composição em fração molar da fase gasosa. Uma curva de composição líquido/vapor é construída para uma determinada pressão e possui uma conformação como visto no Gráfico 10.



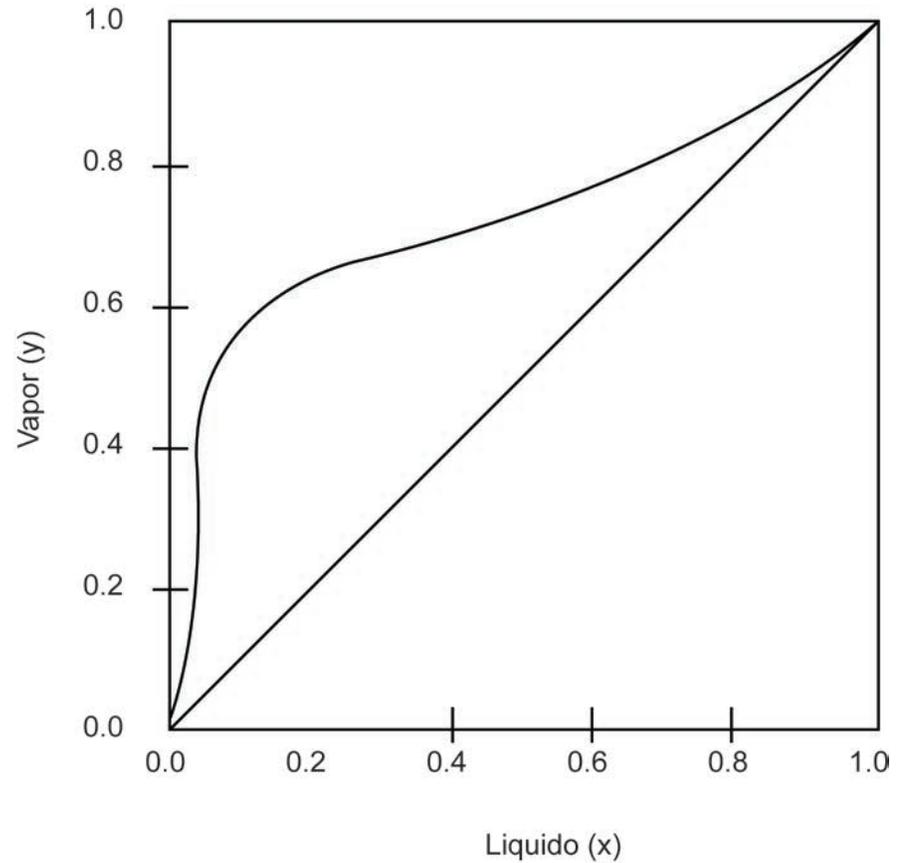
**Gráfico 10** Composição líquido/vapor para mistura binária.

O gráfico de composição líquido/vapor pode assumir diversas configurações em função do valor assumido pela volatilidade relativa, conforme o Gráfico 11.

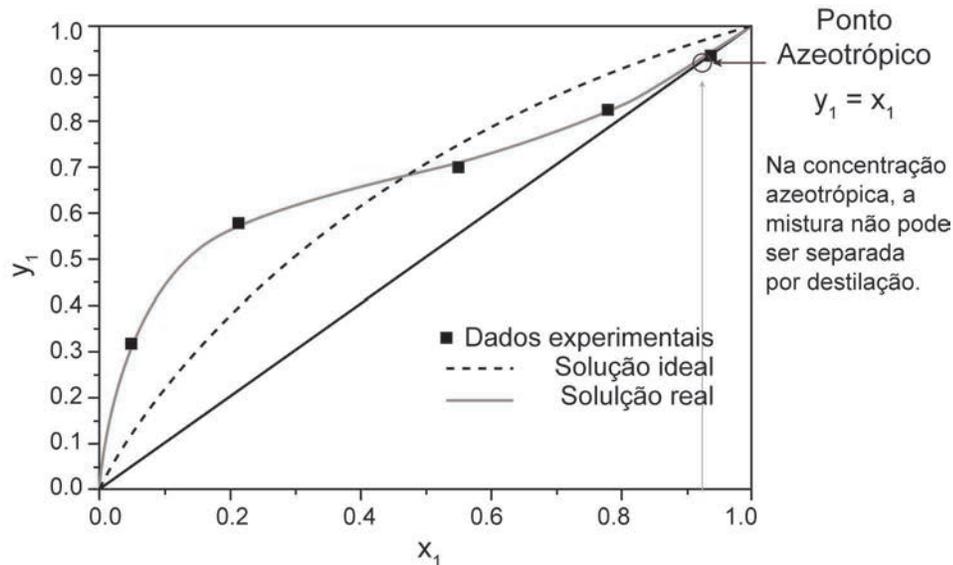


**Gráfico 11** Composição líquido/vapor em função do valor da volatilidade K.

As curvas ideais de composição apresentam o formato simétrico, como mostram os Gráficos 10 e 11. Entretanto, misturas não ideais podem apresentar uma conformação assimétrica, como pode ser visto no Gráfico 12. O caso da mistura de etanol com água, que é o caso objeto de nosso estudo, apresenta uma conformação com forte assimetria, como demonstra o Gráfico 13.



**Gráfico 12** Curva de composição líquido-vapor com forte assimetria.



**Gráfico 13** Sistema não ideal formado pela mistura de etanol e água.

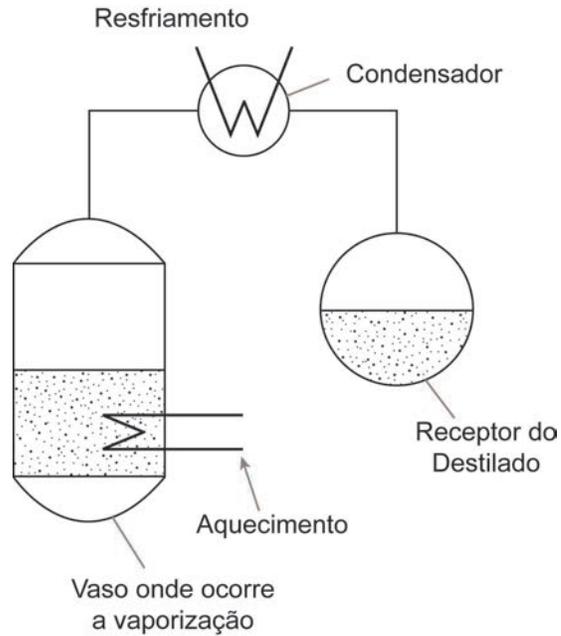
A curva de volatilidade da mistura etanol/água apresenta uma anomalia, como pode ser visto no Gráfico 13; há uma concentração tal em que o líquido emite vapores da mesma concentração, ou seja, em que a volatilidade é igual a um. Quando isso ocorre, diz-se que existe um ponto azeotrópico na mistura.

Na mistura álcool e água, o ponto azeotrópico corresponde à composição em peso de 95,6% de etanol e 4,4% de água, quando o líquido passa a emitir vapores com essa composição exata.

## 5.4 Destilação do álcool etílico

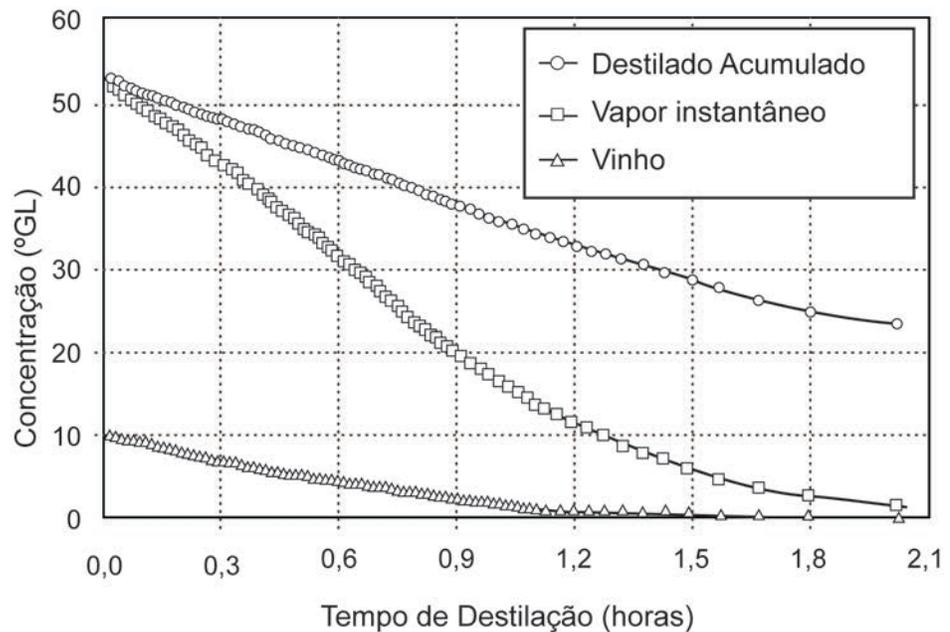
Simplificando para fins didáticos, vamos considerar o vinho delevurado como sendo composto por álcool etílico e água e que, para concentrações inferiores à do ponto azeotrópico, o líquido emite vapores com concentração mais rica no componente mais volátil. Dessa forma, ao evaporarmos um vinho com 7 °GL, por exemplo, será emitido um vapor em torno de 45 °GL.

Assim, o destilador mais simples consiste em um corpo evaporador, no qual o vinho é aquecido por fogo direto ou por uma serpentina em que circula vapor, e em um condensador, no qual os vapores retornam ao estado líquido, conforme a Figura 17.



**Figura 17** Destilador simples do tipo alambique.

Em um aparelho do tipo alambique, que recebe uma carga de líquido alcoólico (vinho) e por aquecimento passa a emitir vapores alcoólicos, deve-se considerar que o vinho vai empobrecendo em álcool ao longo da destilação e, conseqüentemente, passa a emitir vapores com teor alcoólico menor. No Gráfico 14 pode-se ver a variação da concentração alcoólica de um alambique ao longo do tempo de destilação.



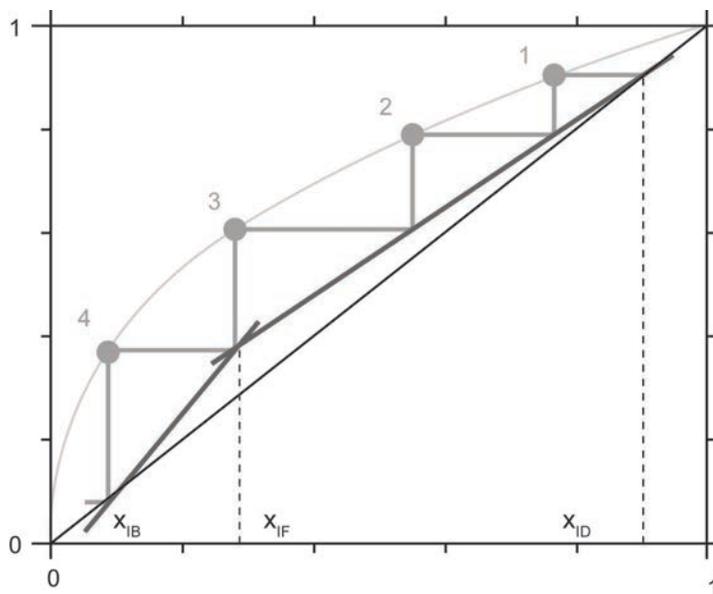
**Gráfico 14** Variação da composição do vinho e do destilado ao longo do tempo, em um destilador do tipo alambique.

A destilação em bateladas realizada em alambique é utilizada atualmente para a produção de bebida alcoólica artesanal como a aguardente de cana, rum, uísque, conhaque etc. Nesse equipamento o destilado é condensado e recolhido, e o teor alcoólico é medido. Quando o teor cai para valores inferiores ao desejado, a destilação é interrompida, ocorrendo assim uma perda de álcool. Para aproveitar todo o álcool gerado na fermentação e atingir valores elevados de teor alcoólico, bastante próximos do ponto azeotrópico, utiliza-se o processo de destilação contínua.

## 5.5 Destilação contínua

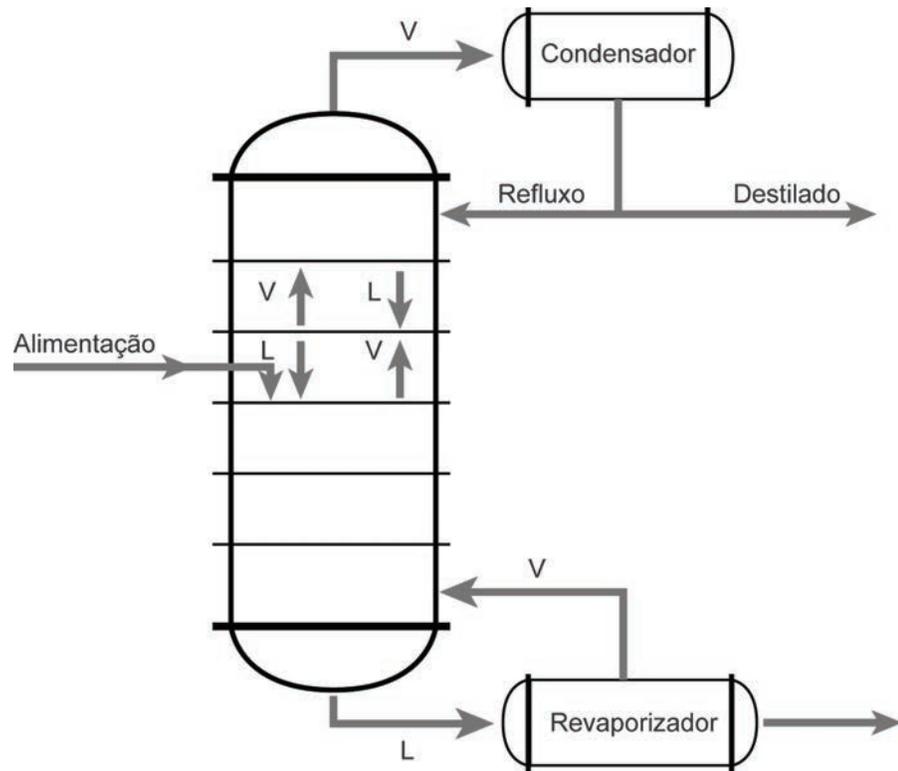
A destilação contínua é realizada em coluna de destilação composta por uma sucessão de pratos, em que o componente mais volátil (álcool) do líquido alimentado sofre um enriquecimento ao ascender na coluna, podendo atingir concentrações próximas ao ponto azeotrópico, caso existam pratos suficientes. A fração do alimentado, vinho, que desce pelo tronco da coluna vai se empobrecendo em seu componente mais volátil, podendo chegar à base da coluna com um teor alcoólico próximo a zero, caso existam pratos suficientes.

Na curva de composição líquido/vapor pode-se traçar a concentração de cada prato dentro da coluna, conforme apresentado no Gráfico 15. Nele, têm-se a concentração de alimentação  $x_{IF}$ , a concentração do destilado  $x_{ID}$  e a concentração do resíduo  $x_{IB}$ .



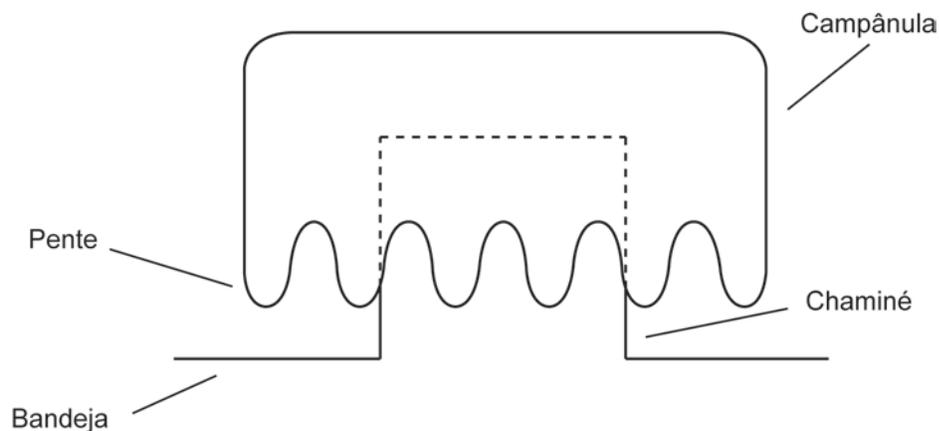
**Gráfico 15** Curva de composição vapor-líquido em que estão traçadas as linhas de operação e a composição de cada prato.

Na Figura 18 tem-se uma representação de uma coluna em que foi acrescentado o aquecedor no pé de cuba e o condensador, responsável pelo refluxo.



**Figura 18** Coluna de destilação de bandejas com o aquecedor reevaporador e o condensador.

Nas bandejas é realizado o contato entre a fase vapor ascendente e a fase líquida descendente, ocorrendo a troca de massa entre as duas fases, resultando no enriquecimento da fase vapor em álcool à custa da fase líquida descendente que empobrece. Para realizar o contato entre a fase vapor e a fase líquida, utilizam-se as campânulas ou canecas borbotadoras, como pode ser visto na Figura 19.

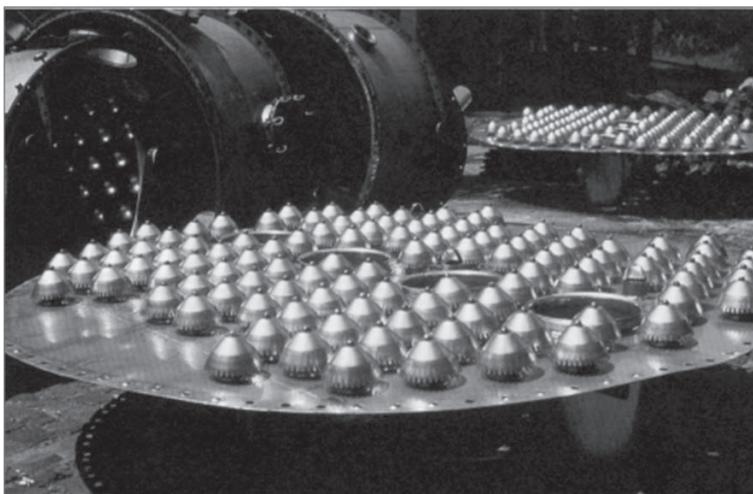


**Figura 19** Campânula ou caneca borbotadora.

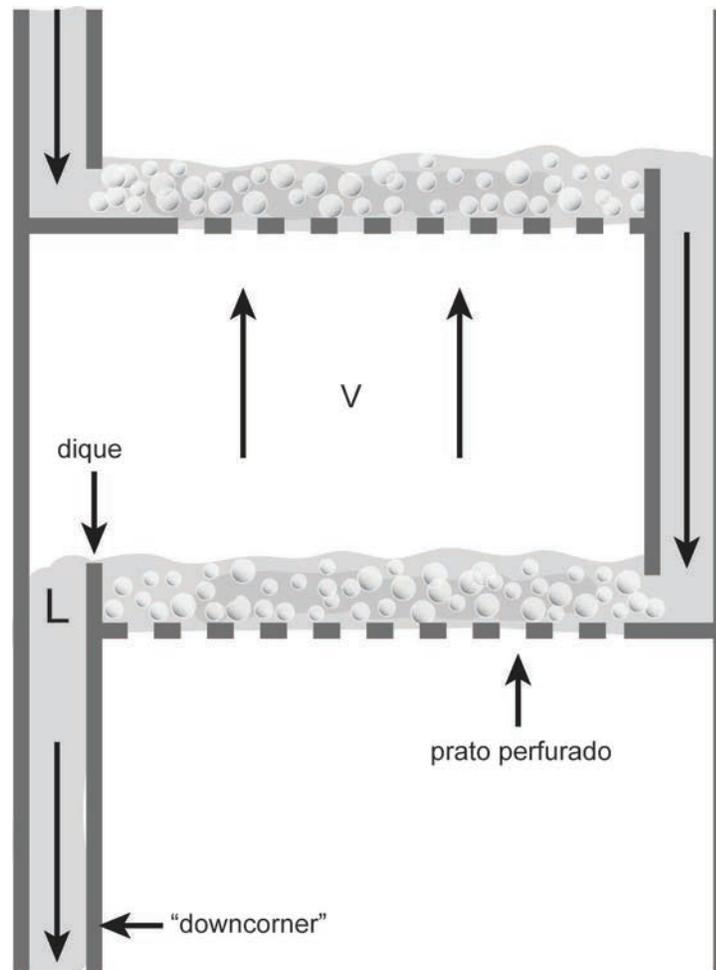
Fonte: Lopes (1986).

Esse tipo de borbotador consiste em um tubo por onde ascendem os vapores e uma campânula com ranhuras na lateral denominadas pentes, em que o vapor sai em forma de pequenas bolhas, executando a troca de massa com o líquido. As campânulas são dispostas nas bandejas em número que pode chegar a várias dezenas (ver Figura 20), dependendo da capacidade de produção da coluna destiladora.

Além do sistema de campânulas existem outros tipos de dispositivos de contato vapor-líquido como as bandejas perfuradas que são mais simples que o sistema de bandejas e equipam uma grande parte das destilarias de álcool. Nesse sistema, o vapor alcoólico é insuflado através dos orifícios, borbulhando no líquido sobre a bandeja. Uma representação esquemática de uma coluna com bandejas de pratos perfurados pode ser vista na Figura 21.



**Figura 20** Bandeja de uma coluna de destilação mostrando a disposição das calotas.



**Figura 21** Coluna de destilação com bandejas perfuradas.

O cálculo do número de bandejas necessárias para que o vinho atinja a base da coluna praticamente isento de álcool, ou que, na parte de concentração da coluna, o álcool atinja o topo com o teor desejado era realizado em função de dados empíricos dos construtores.

Em 1893, Sorel publicou um trabalho intitulado *La rectification de l'alcool*, em que propôs um método matemático para a determinação da composição de misturas binárias em coluna de bandejas. Esse trabalho foi seguido por outro, em 1899. Na mesma linha, surgiram outros pesquisadores, como Lewis, do Instituto Tecnológico de Massachutes, em 1909 e como resultado surgiu o método Sorel-Lewis para o cálculo do número de pratos teóricos de uma coluna de destilação.

Como o método Sorel-Lewis é bastante trabalhoso, em 1925 foi publicado um método mais simples que recebeu o nome de *McCabe-Thiele*, homenageando os autores. A descrição desses métodos e sua aplicação podem ser encontradas em livros de operações unitárias.

## 5.6 Destilação de álcool

A destilação do vinho para a produção de álcool hidratado, em especial o do tipo carburante, é realizada por duas colunas, uma denominada de destiladora e outra de retificadora. A coluna destiladora é composta por três unidades superpostas designadas pelas letras A, A1 e D. Nessas unidades o etanol é separado do vinho (inicialmente entre 7 e 10 °GL) e sai sob a forma de um produto intermediário chamado flegma, cujo teor alcoólico se situa entre 40 e 50 °GL.

O vinho é alimentado no topo da coluna A1, descendo pelas bandejas e sofrendo a depuração, sendo a flegma retirada no fundo desta (bandeja A16) e enviada à coluna B. Os voláteis, principalmente ésteres e aldeídos, são concentrados na coluna D, retirados no seu topo e condensados em dois condensadores, R e R1, e grande parte desse líquido (90% a 95%) retorna ao topo da coluna D, e a outra é retirada como álcool de segunda, com graduação de aproximadamente 92 °GL. Esse álcool geralmente retorna a dorna volante para ser reprocessado.

A denominada coluna A ou de esgotamento do vinho tem por finalidade retirar a maior quantidade possível de álcool, gerando um líquido residual em que o etanol esteja presente em valores bastante baixos (menor que 0,02 °GL). O líquido restante no pé da coluna A é a vinhaça. Esse efluente é retirado em uma proporção aproximada de 13 litros para cada litro de álcool produzido e é constituído principalmente por água (96%), sólido em suspensão e sólidos solúveis. Sua principal utilização é como agente de irrigação dos canaviais e como fertilizante por conter alta proporção de matéria orgânica e potássio sob a forma de sólidos solúveis.

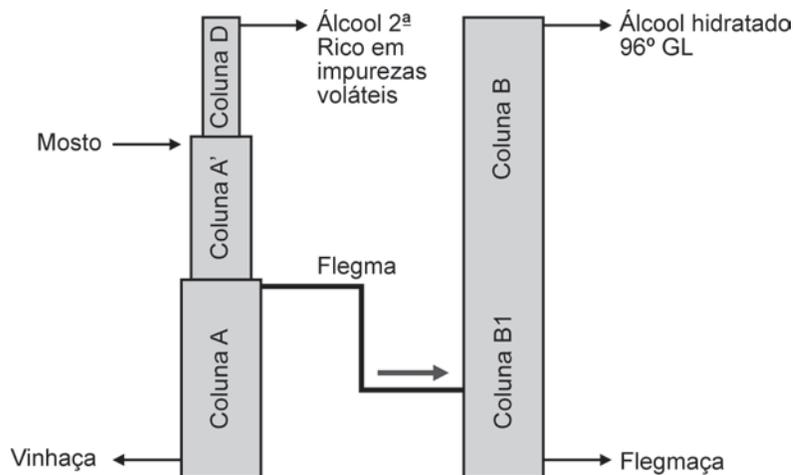


Figura 22 Aparelho destilador de álcool hidratado.

Os voláteis retirados do topo da coluna B ou retificadora, constituídos predominantemente por etanol, passam por uma sequência de condensadores em que parte do calor é recuperada para aquecer o vinho. Uma parte do condensado constitui o refluxo da coluna, e o restante é retirado como álcool hidratado 96 °GL. Do fundo da coluna B é retirada uma solução aquosa chamada flegmaça, que foi esgotada e pode ser reciclada no processo ou eliminada.

A coluna B tem por função, além de elevar a concentração da mistura hidroalcoólica, realizar a retirada de várias impurezas voláteis geradas na fermentação, como álcoois denominados de homólogos superiores, por exemplo, o propílico, o butílico e amílicos. Esses compostos apresentam durante a destilação uma volatilidade que varia em função da concentração alcoólica: em baixa concentração se comportam como mais voláteis e em alta concentração, como menos voláteis. O álcool isoamílico é o principal representante desses compostos, apresentando o seguinte comportamento:

- É praticamente insolúvel em água e em soluções alcoólicas muito diluídas;
- Ao ser gerado na fermentação fica emulsionado no vinho e é arrastado durante a ebulição, comportando-se como produto mais volátil;
- Ao atingir as regiões de alta concentração de álcool na coluna ele é dissolvido e passa então a se comportar como produto menos volátil.

Esses álcoois, que recebem a denominação de óleos fúseis, se acumulam nas bandejas próximas à de alimentação do flegma na coluna B e são retirados, resfriados, lavados, decantados e armazenados para posterior comercialização. Esses produtos são formados predominantemente por álcool isoamílico e isobutílico, e sua produção gira ao redor de 0,1% a 0,2% do álcool produzido, possuindo a seguinte composição média:

Álcool etílico	5,00%
Álcool n propílico	12,50%
Álcool isobutílico	15%
Álcool isoamílico	62,50%

Esse subproduto tem uma grande utilização industrial como solvente na indústria química, principalmente na fabricação de tintas e vernizes. Além dessa utilização no mercado interno, também é bastante requisitado pelo mercado externo.

# UNIDADE 6

Desidratação do etanol



## 6.1 Primeiras palavras

Como já foi visto, a mistura de etanol com água apresenta um ponto azeotrópico quando a sua composição é formada por 95,6% em peso de álcool a pressão de 760 mmHg. Nessa proporção, a mistura apresenta um ponto de ebulição inferior a qualquer um dos componentes puros e emite vapor com a mesma composição que o líquido gerador. Assim, essa concentração, que corresponde a aproximadamente 96% de etanol em volume (°GL), é a maior possível de ser obtida pelo processo convencional de destilação em colunas de pratos ou de recheio. Para se obter um álcool com concentração superior ao valor acima de 95,6% é necessário recorrer a outros meios.

## 6.2 Álcool anidro

Sob o ponto de vista tecnológico e de mercado, o álcool é comercializado em dois grandes tipos: aqueles que apresentam uma concentração próxima, mas inferior ao ponto azeotrópico, denominados álcoois hidratados; e os produtos que apresentam uma concentração superior a esse ponto, em geral acima de 99%, denominados anidro.

O álcool anidro é produzido no Brasil para ser utilizado na mistura carburante com a gasolina, que atualmente está na proporção de 25%, operando como agente antidetonante pela elevação do índice de octanas do combustível. O álcool anidro, assim como o hidratado para fins combustíveis, é especificado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2005), conforme Resolução nº 36, de 6 de dezembro de 2005 (anexo ao Regulamento Técnico 7/2005), visto na Tabela 2 a seguir.

**Tabela 2** Especificação técnica para o álcool anidro.

Característica	Unidade	Álcool Anidro	Álcool Hidratado
Aspecto	*	Límpido e isento de impurezas	
Cor	*	De incolor a amarelado e isento de corantes	
Acidez total como ácido acético (máx.)	mg/L	30	30
Condutividade elétrica (máx.)	mS/m	500	500
Massa específica a 20 °C (máx.)	kg/m <sup>3</sup>	791,5	807,6 a 811,0
Teor alcoólico (mín.)	°INPM	99,3	92,6 a 93,8
pH	*	*	6 a 8
Resíduo por evaporação (máx.)	mg/100mL	3	3

**Tabela 2** *Continuação...*

Característica	Unidade	Álcool Anidro	Álcool Hidratado
Teor de hidrocarbonetos (máx.)	%vol	3	3
Íon cloro (máx.)	mg/kg	*	1
Teor de etanol (mín.)	%vol	99,6	95,1
Íon sulfato (máx.)	mg/kg	*	4
Íon ferro (máx.)	mg/kg	*	5
Sódio (máx.)	mg/kg	*	2
Cobre (máx.)	mg/kg	0,07	*

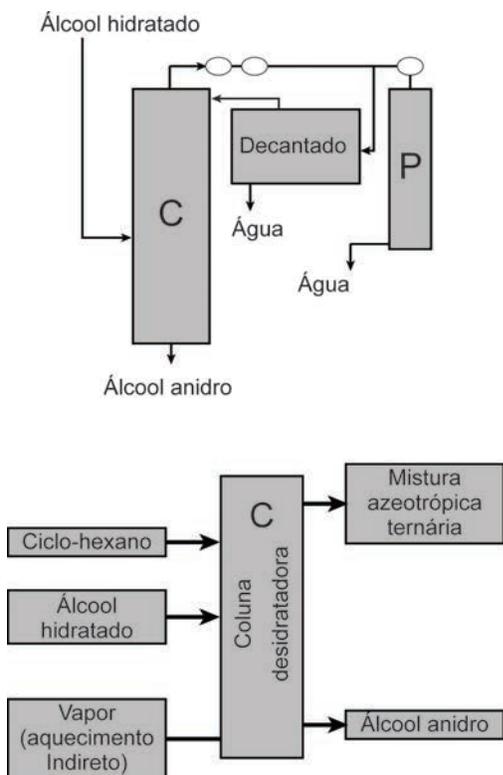
Para elevar a concentração do álcool a valores superiores ao seu ponto azeotrópico recorre-se a processos tecnológicos de desidratação. Os mais utilizados pelas usinas e destilarias no Brasil são:

- processo azeotrópico por meio do uso do benzol ou do ciclo-hexano como agente desidratante;
- processo extrativo utilizando a glicerina ou o monoetileno glicol;
- peneira molecular pela ação das zeólitas.

### 6.2.1 Desidratação por meio do processo azeotrópico

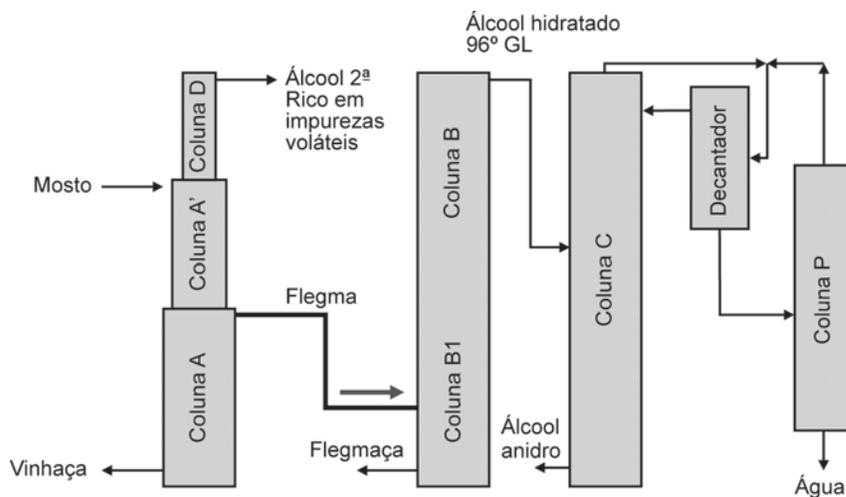
A desidratação azeotrópica do álcool consiste na formação de um novo azeótropo pela adição de um terceiro componente na mistura hidroalcoólica que apresente um ponto de ebulição menor que o azeótropo binário (álcool/água). No Brasil, esse terceiro componente foi por muitos anos o benzol, mas em razão dos problemas de saúde que o benzeno pode causar nas pessoas ele foi substituído pelo ciclo-hexano a partir de 1996.

A solução composta por ciclo-hexano, álcool e água forma um azeótropo de ponto de ebulição (63 °C) inferior ao do álcool puro (78,4 °C), comportando-se assim como produto mais volátil e se concentrando nas partes superiores da coluna, de onde é retirada. O etanol, cujo ponto de ebulição é maior, comporta-se como produto menos volátil, sendo retirado pela parte inferior da coluna de desidratação (C), conforme apresentado na Figura 23.



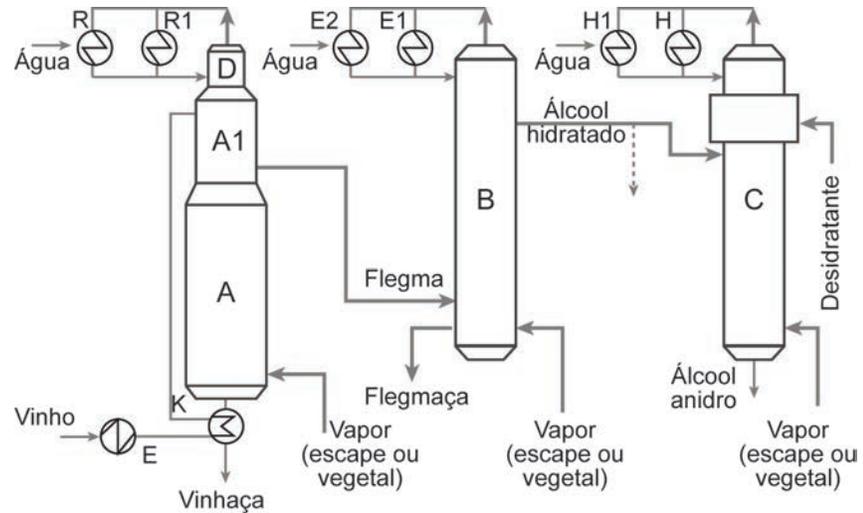
**Figura 23** Indicação dos fluxos de matéria na coluna desidratadora C.

A mistura azeotrópica ternária retirada pelo topo da coluna C é enviada a um decantador onde ocorre a separação em duas camadas, em que a superior rica em ciclo-hexano retorna para a coluna C como refluxo, e a camada inferior pobre em ciclo-hexano é enviada para a coluna P de recuperação. Nessa coluna o ciclo-hexano é concentrado, saindo pelo topo, sendo então condensado e reutilizado na coluna desidratadora C. Pela base da coluna é retirada a água, que é descartada. No fluxograma da Figura 24 pode-se ver uma representação simplificada desse processo.



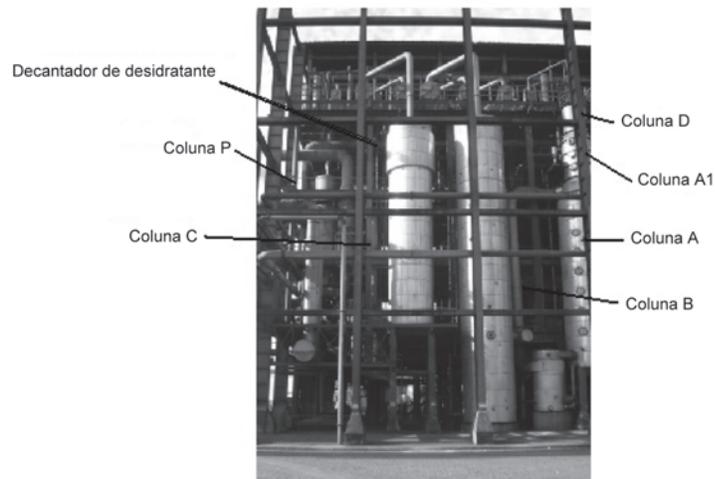
**Figura 24** Fluxograma da desidratação azeotrópica.

Na Figura 25 é apresentado um fluxograma mais completo de um conjunto destilador para álcool anidro, em que o decantador do azeótropo ternário está acoplado à coluna desidratadora. Na Figura 26 podemos ver a fotografia de um aparelho desidratador operando pelo sistema azeotrópico.



**Figura 25** Aparelho destilador de álcool anidro com decantador acoplado à coluna desidratadora.

Fonte: Meirelles (2011).



**Figura 26** Fotografia de uma destilaria desidratadora pelo processo azeotrópico.

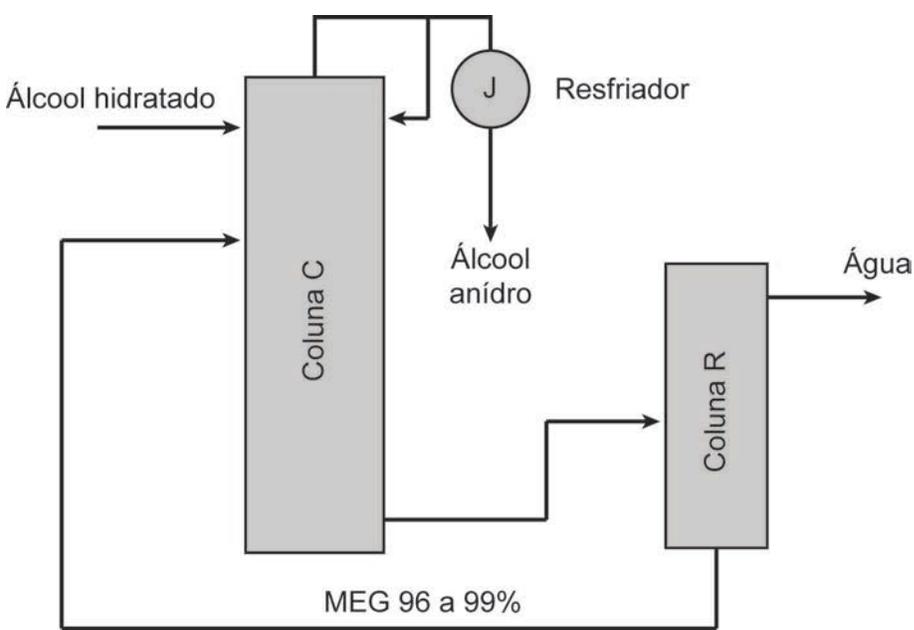
O processo azeotrópico de desidratação do álcool é utilizado por 80% das destilarias de álcool anidro em operação no Brasil e apresenta os seguintes parâmetros técnicos operacionais:

- Demanda de vapor a 1,5 kg/cm<sup>2</sup> (coluna C): 1,0 kg/L de álcool;
- Demanda de vapor a 1,5 kg/cm<sup>2</sup> (coluna P): 0,6 kg/L de álcool;
- Demanda de água para resfriamento: 40 L/L de álcool;
- Demanda de desidratante (reposição de perdas): 0,58 L/L de álcool.

## 6.2.2 Desidratação extrativa pelo monoetileno glicol (MEG)

No processo de desidratação pelo MEG também é utilizada uma coluna em que o desidratante é alimentado pela parte superior e o álcool a ser desidratado é alimentado na bandeja situada a dois terços da base. O desidratante MEG absorve e arrasta a água para a base da coluna, e os vapores de álcool anidro saem pela parte superior, onde o álcool é condensado e enviado para armazenamento nos reservatórios.

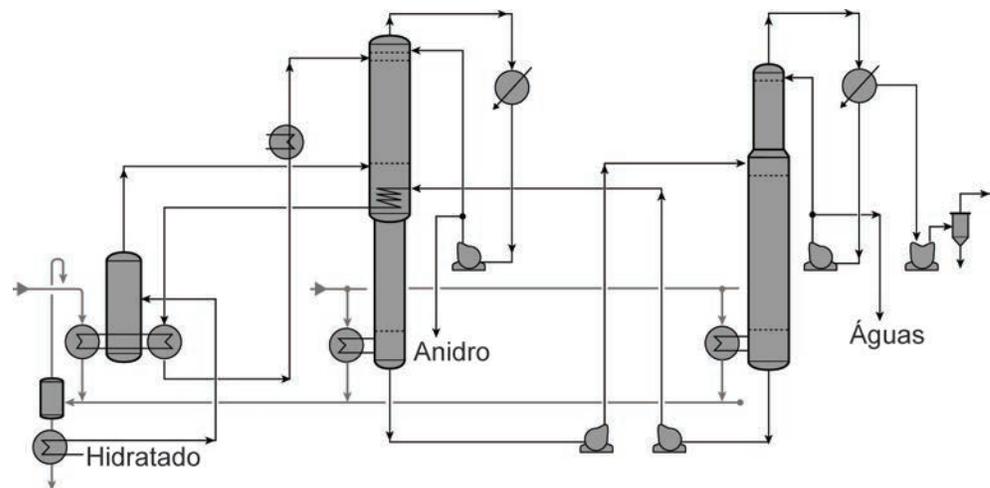
A mistura contendo água, MEG e uma pequena quantidade de álcool é enviada para uma coluna de recuperação, de onde retorna para o processo de desidratação. O MEG concentra as impurezas retiradas do álcool e por isso se torna mais corrosivo, e assim é necessária a sua purificação, que é feita por sua passagem em uma coluna de resinas de troca iônica, que retém os sais e reduz a sua acidez. Na Figura 27 temos um fluxograma simplificado do processo de desidratação por MEG.



**Figura 27** Fluxograma simplificado do processo de desidratação por MEG.

Na Figura 28 pode-se ver um fluxograma detalhado desse processo de desidratação e como a maioria dos aparelhos operam com essa técnica. A desidratação utilizando o MEG como agente desidratante responde atualmente por aproximadamente 15% das destilarias de álcool anidro em operação no Brasil. As características operacionais desses aparelhos são:

a) Características do MEG	
Peso molecular	> 62
Pressão de vapor	< 0,06 mmHg a 20 °C
Densidade	1,112 g/mL
Ponto de ebulição	>197 °C
b) Demanda de vapor	
Coluna C (pressão de 10 kg/cm <sup>2</sup> )	0,60 kg/L de álcool
Coluna R (pressão de 1,5 kg/cm <sup>2</sup> )	0,20 kg/L de álcool
c) Outros parâmetros	
Demanda de água	25 a 28 L/L de álcool
Demanda de desidratante	0,16 L/m <sup>3</sup> de álcool
Energia elétrica	6 kWh/m <sup>3</sup> de álcool
Reciclagem de álcool	0,3% máx.



**Figura 28** Desidratadora com MEG modelo BSM atual.

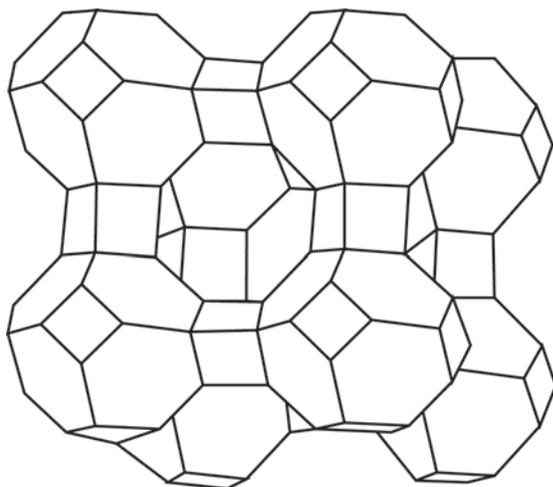
Fonte: adaptada de Meirelles (2011).

### 6.2.3 Desidratação por peneira molecular

O processo de desidratação por peneira molecular está fundamentado na propriedade que alguns materiais têm de absorver seletivamente certos compostos de uma mistura. Nesse processo de desidratação o agente desidratante são as zeólitas, que são estruturas cristalinas de alumínio e silicatos. Na desidratação do álcool são utilizadas zeólitas sintéticas de estrutura cristalina do tipo A, que se apresentam com o formato de pequenas esferas (ver Figura 29).

As zeólitas têm a característica de, sob certas condições de temperatura e pressão, absorver somente a água da mistura hidroalcoólica. Assim, a técnica consiste em passar a mistura hidroalcoólica por um leito de zeólitas em que a água é absorvida e o etanol anidro é recuperado.

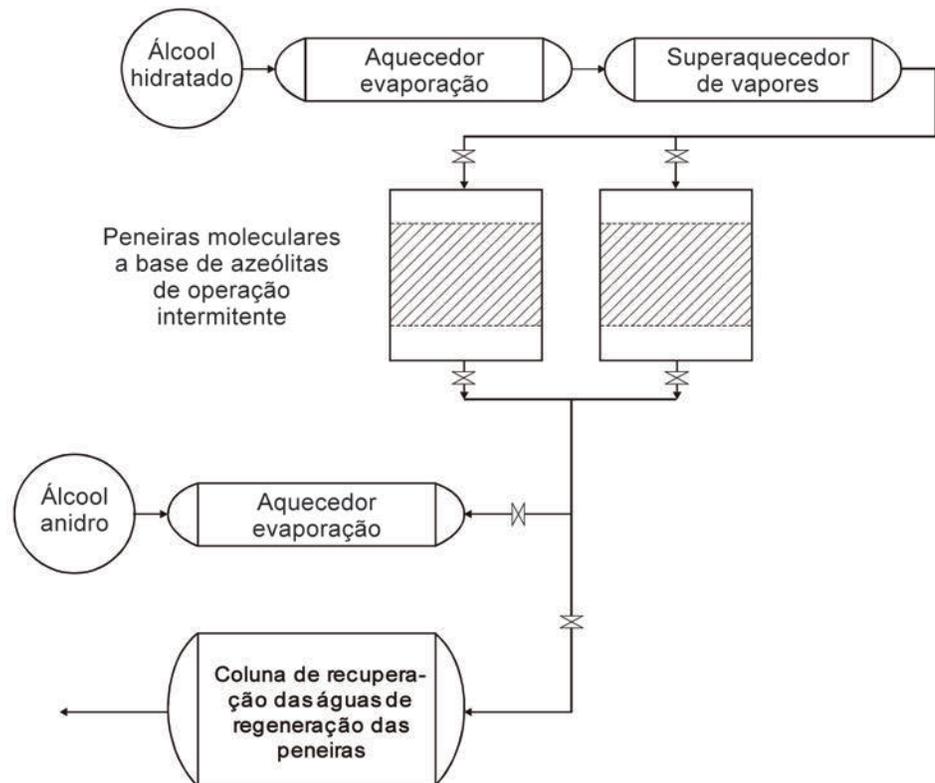
As zeólitas utilizadas no processo de desidratação do álcool etílico possuem poros de diâmetro ao redor de 3 Angströms (1 Å equivale a 10<sup>-10</sup> m). Esse diâmetro é pequeno para moléculas de etanol, que têm cerca de 4 Å de tamanho, mas são suficientemente grandes para que moléculas de água, cujo tamanho é de 2,8 Å, passem. Assim as moléculas de água podem penetrar nos poros e se alojar no interior da zeólita, num fenômeno chamado adsorção. Como esse método de seleção por tamanho é semelhante ao das peneiras, passou então a receber essa denominação (peneira molecular).



**Figura 29** Estrutura da zeólita tipo A.

Na prática, o álcool hidratado é aquecido e em seguida vaporizado nos trocadores de calor. Os vapores são então enviados ao dispositivo em que se encontra o leito de zeólitas. Os vapores de água são então absorvidos pelos poros do desidratante, e o álcool anidro sob a forma de vapor é condensado, resfriado e encaminhado para a armazenagem. Como a operação da peneira

molecular é intermitente, ou seja, após um certo tempo o desidratante fica saturado de água, são necessárias duas unidades operando: uma desidratando e outra sendo regenerada. Na Figura 30 pode-se ver um fluxograma desse processo de desidratação, e na Figura 31, a fotografia de uma unidade desidratadora com as colunas de zeólita em destaque.



**Figura 30** Fluxograma do processo de desidratação por peneira molecular.



**Figura 31** Fotografia de uma unidade desidratadora por peneira molecular.

Periodicamente deve ser realizada a regeneração da zeólita pela passagem sob vácuo de vapores alcoólicos que absorvem a água. O produto dessa

operação é um líquido alcoólico com 25 °GL, que é recuperado no processo por destilação do álcool contido. Uma peneira molecular pode ser regenerada ao longo da safra por um período que pode atingir até oito anos.

Para que a peneira molecular tenha uma vida longa é necessário que se tenha alguns cuidados operacionais, entre eles:

- garantir sempre uma perfeita regeneração;
- evitar temperaturas altas de operação;
- evitar contaminação do leito;
- evitar ocorrência de duas fases no fluxo;
- evitar impactos no leito.

#### 6.2.4 Avaliação dos três processos de desidratação em uso no Brasil

O principal atrativo do processo azeotrópico é ser um sucessor do antigo, que utilizava o benzol. O processo utilizando o MEG tem o benefício de ser um desidratante de baixa toxidez, e o álcool desidratado pode ser destinado para consumos mais nobres que ser queimado em motores, como o farmacêutico ou na indústria de perfumaria.

O processo de desidratação por peneira tem como grande vantagem a não utilização de produtos químicos que podem contaminar o álcool. No entanto, as desvantagens são o custo mais elevado de implantação e a necessidade de se utilizar vapor com pressão mais elevada (10 kg/cm<sup>2</sup>) em lugar do vapor de escape a 1,5 kg/cm<sup>2</sup>. Na Tabela 3 a seguir são apresentados os indicadores de consumo e de investimento dos três processos, segundo Meirelles (2011).

**Tabela 3** Indicadores de consumo e de investimento dos três processos de destilação.

Item	Destilação azeotrópica	Desidratação extrativa (MEG) (modelo BSN)	Peneira molecular
Vapor (kg/L)	1,5 a 1,6	0,45 a 0,70	0,55 a 0,80 (*)
Água (L/L)	65	30 a 38	55
Desidratante (L/m <sup>3</sup> )	0,5 a 0,6	0,15 (máx.)	10 anos/carga
Reciclo de álcool (%)	0 a 25	2,0 (máx.)	15,0 (mín.)
Energia elétrica (kWh/m <sup>3</sup> )	11,1 (mín.)	7,22 (máx.)	9,51 (mín.)
Custo do investimento	100	200 a 250	140 a 160

(\*) Vapor de alta pressão.

### **6.3 Considerações finais**

Nesta unidade procuramos apresentar de maneira imparcial os três processos tecnológicos de desidratação de álcool em uso no Brasil; provavelmente um desses três deverá acabar predominando e se tornar majoritário.

Na prática a opção por um desses processos está associada também a questões particulares e subjetivas, pois não existe uma vantagem significativa de um processo em relação ao outro.

# **UNIDADE 7**

Efluentes da fabricação de álcool e  
aspectos hídricos



## 7.1 Primeiras palavras

Nesta unidade, trataremos dos principais efluentes gerados durante a produção de álcool. O destino correto desses resíduos deve estar de acordo com a legislação vigente, que proíbe o descarte diretamente no ambiente.

## 7.2 Problematizando o tema

A produção de álcool etílico por meio da destilação de um mosto fermentado gera uma série de efluentes dos quais os mais importantes são a vinhaça e a flegmaça. Esses efluentes devem ter um destino ambientalmente correto, em especial a vinhaça, pelo grande volume, além da elevada carga poluidora. Já a flegmaça retirada pela base da coluna retificadora B apresenta uma baixa presença de impurezas e um volume efluente de aproximadamente um litro por litro de álcool produzido. Seu inconveniente é a temperatura, próxima de 100 °C, e que, portanto, deve ser resfriada antes de ser utilizada em algum local do processo.

## 7.3 Vinhaça

Os termos vinhaça, vinhoto, garapão etc., são utilizados para designar o efluente da operação de destilação retirado pela base da coluna de esgotamento do vinho (A). A vinhaça consiste no vinho que foi retirado do álcool e ao qual foi incorporado o vapor condensado utilizado no aquecimento dessa coluna, quando o sistema utilizado for o de borbotagem. Para diminuir o volume de vinhaça, muitas destilarias estão adotando o sistema de aquecimento indireto da coluna A por meio de um trocador de calor (K1), que aquece a coluna sem incorporar o condensado à vinhaça, diminuindo assim o seu volume.

O cálculo do volume de vinhaça gerado na operação de destilação pode ser realizado por meio de equações de balanço de massa da coluna. Pelo esquema da Figura 32, podemos escrever:

$$\text{Vinhaça} + \text{flegmaça} + \text{álcool de segunda} = \text{vinho} + \text{vapor}$$

Considerando que o volume de álcool de segunda que é gerado é bastante pequeno em relação aos demais fluxos e explicitando o termo vinhaça da equação, teremos:

$$\text{Vinhaça} = \text{vinho} + \text{vapor} - \text{flegmaça}$$

Essa expressão é válida para o caso de o aquecimento da coluna A ser por borbotagem. No caso de aquecimento indireto, sem a incorporação do vapor condensado à vinhaça, teremos:

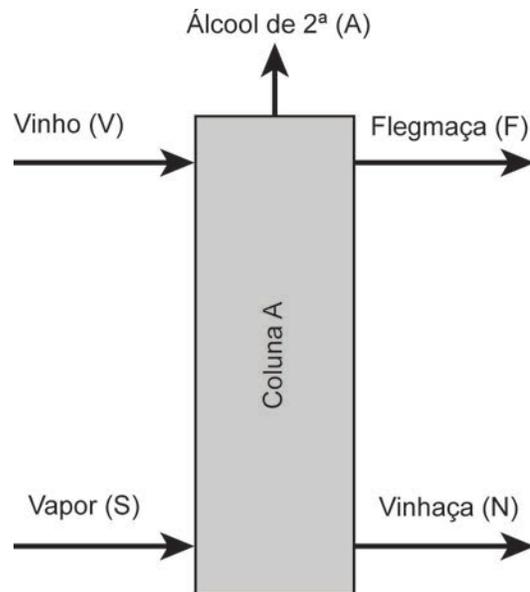
$$\text{Vinhaça} = \text{vinho} - \text{flegmaça}$$

Utilizando a notação da Figura 32, teremos:

$$\text{Vinhaça (N)} = V + S - A - F$$

$$N = V + S - F$$

Para um consumo específico de vapor de 2 kg/litro de álcool e para que essa coluna gere um flegma com aproximadamente 50 °GL processando um vinho com g °GL, podemos realizar os cálculos conforme a Tabela 4.



**Figura 32** Fluxos de massa numa coluna A de destilação.

**Tabela 4** Produção de vinhaça em litros por litro de álcool produzido.

Teor alcoólico do vinho (°GL)	Aquecimento da Coluna A Sistema de borbotagem	Aquecimento da Coluna A Sistema indireto Trocador K1
6	16,7	14,7
7	14,3	12,3
8	12,5	10,5
9	11,1	9,1
10	10,0	8,0

### 7.3.1 Composição da vinhaça

A vinhaça se apresenta como uma solução com porcentagem de 2% a 8% de sólidos dissolvidos, dos quais 70% são formados por matéria orgânica. Do material mineral que compõe a vinhaça, 30% é formado pelo elemento potássio. A alta porcentagem de matéria orgânica nos sólidos dissolvidos é a responsável pela elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) desse efluente, que torna seu descarte em corpos d'água proibido.

A Tabela 5 apresenta a composição da vinhaça típica originária de uma destilaria autônoma (mosto de caldo de cana) e de uma usina de açúcar (mosto de melaço).

**Tabela 5** Composição da vinhaça em kg/m<sup>3</sup>.

Componente	Mosto (Melaço)	Mosto (Caldo)
Carbono	19,2	5,9
Nitrogênio	1,2	0,3
Fósforo	0,2	0,2
Potássio	7,8	1,2
Cálcio	3,5	0,7
Magnésio	1	0,2
Sulfato	6,4	0,6
Matéria orgânica	63,4	19,5
Relação C/N	16	19,7

### 7.3.2 Vinhaça e o meio ambiente

Como já foi visto, a vinhaça tem características altamente poluidoras em razão de sua elevada DBO, que apresenta valores ao redor de 20.000 mg/L a 20 °C. Se compararmos, por exemplo, ao esgoto sanitário doméstico, ela é cem vezes maior, pois o valor da DBO do esgoto está em torno de 200 mg/L. A legislação e os órgãos ambientais vetam o seu descarte em corpos d'água superficiais ou subterrâneos, e, assim, deve-se prever outro destino para ela..

As unidades brasileiras produtoras de álcool optaram pelo descarte da vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar, pois esse composto é rico em matéria orgânica e potássio, sendo, portanto, fonte de nutrientes e agente de fertilização da plantação.

### 7.3.3 Aplicações da vinhaça

A literatura apresenta uma ampla gama de aplicações para a vinhaça, por exemplo, na alimentação animal após a vinhaça ser concentrada<sup>3</sup>, também como fonte de gás metano para utilização como geração de energia/calor pela sua queima. No entanto, no Brasil a vinhaça tem sido utilizada em sua totalidade como agente de fertilização e irrigação nas lavouras de cana.

Apesar de ser uma excelente fonte de matéria orgânica e de potássio, esse efluente é pobre em nitrogênio, cálcio, fósforo e magnésio, necessitando de uma complementação desses componentes. A aplicação da vinhaça *in natura* na lavoura deve ser realizada com o conhecimento das dosagens adequadas e com um controle da quantidade aplicada, principalmente no que diz respeito ao potássio, cuja concentração elevada poderá criar problemas nutricionais na cana.

No Estado de São Paulo, a aplicação da vinhaça no solo é regulamentada pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (Cetesb), que solicita o seu monitoramento conforme a Norma Técnica (CETESB, 2011) de janeiro de 2005, nos itens: pH, resíduo não filtrável total, dureza, condutividade elétrica, nitrogênio nitrato, nitrogênio nitrito, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldhal total, cálcio, potássio, magnésio, sulfato, fósforo total, DBO e Demanda Química de Oxigênio (DQO). A dosagem máxima a ser aplicada no solo pode ser calculada pela expressão:

$$m^3/ha = [(0,05 \cdot CTC - ks) \cdot 3744 + 185]$$

em que:

- 0,05: 5% de CTC (Capacidade de Troca Catiônica expressa em  $\text{cmolc/dm}^3$  a pH 7);
- ks: concentração de K no solo em  $\text{cmolc/dm}^3$ ;
- 3.744: constante para transformar os resultados da análise de fertilidade expressos em  $\text{cmolc/dm}^3$  ou  $\text{meq/100 cm}^3$  para kg de potássio num volume de um hectare com profundidade de 0,8m;
- 185: quantidade de K extraído pela cana por corte/ha.

### 7.3.4 Resfriamento da vinhaça

A vinhaça, tal como sai pela base da coluna destiladora A, apresenta uma temperatura em torno de  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , impossibilitando seu uso como agente de fertirrigação dos canaviais. Para proceder o seu resfriamento utiliza-se um equipamento em que a vinhaça é aspergida na parte superior, descendo em contracorrente com o ar impulsionado por um ventilador. Dessa forma, parte da água presente na vinhaça, de 5% a 8%, evapora (*flasheia*), provocando um pequeno aumento da concentração. O calor latente necessário para evaporar a água provoca uma redução da temperatura da vinhaça. Um exemplo de um equipamento desse tipo, que possui o formato de torre, pode ser visto na Figura 33.



**Figura 33** Torre de resfriamento de vinhaça.

Fonte: Tecniplas (2011).

### 7.3.5 Concentração da vinhaça

O grande problema da aplicação da vinhaça nos canais é a concentração em material dissolvido, que é muito baixa (3% a 4% na maioria dos casos). Essa concentração inviabiliza seu transporte por longas distâncias. Algumas técnicas como a utilização do aquecimento indireto na coluna A e a produção de vinho com elevado teor alcoólico reduzem o volume da vinhaça pelo aumento de sua concentração. Essas técnicas podem diminuir a produção desse efluente de 12 a 14 litros/litro de álcool para aproximadamente 8 litros/litro de álcool. Dessa forma, a redução do volume de vinhaça pode viabilizar o transporte para maiores distâncias, aumentando o raio de sua aplicação, e com isso permitindo que a unidade atenda de maneira econômica as determinações do órgão paulista do meio ambiente.

Na Tabela 6 é apresentada a relação de litros de vinhaça por litros de álcool para as concentrações da vinhaça *in natura* e concentrada a 35% e 65%. Na sequência, o quadro traz o raio econômico de aplicação da vinhaça para diversos valores de sua concentração.

**Tabela 6** Raio econômico de aplicação da vinhaça em função de sua concentração em sólidos dissolvidos.

Concentração da vinhaça	Relação litro/litro
<i>In natura</i>	12
0,05	0,4
0,05	0,74

Concentração em °Brix	Raio econômico em km
3	5
5	35
10	39
15	40
20	40
25	41
30	41

A concentração da vinhaça é realizada por meio de evaporadores em múltiplo efeito, em geral de quatro a seis efeitos, que podem elevar a sua concentração para 20% em sólidos dissolvidos. Em alguns casos essa concentração pode atingir 30% ou mesmo 65%. Com a concentração da vinhaça, seu raio econômico

de aplicação pode ser multiplicado, elevando de 5 km para mais de 40 km. A literatura cita que na França a vinhaça concentrada a 60% era incinerada e as cinzas resultantes, ricas em potássio, eram recuperadas. A desvantagem desse sistema era a perda da rica matéria orgânica da vinhaça na queima.

A composição da vinhaça concentrada a 35 e 65 °Brix, comparando com a vinhaça in natura a 4 °Brix (DEDINI, 2011), está apresentada na Tabela 7.

**Tabela 7** Composição da vinhaça concentrada a 35 e 65 °Brix.

Características	In natura 4 °Brix	Concentração 35 °Brix	Concentração 65 °Brix
pH	4,4 – 4,6	4,6 – 5,0	4,6 – 5,0
Temperatura (°C)	80 – 100	50 – 60	50 – 60
DBO (mg/L)	19.800	173.250	321.750
DQO (mg/L)	45.000	393.750	731.250
Sólidos totais (mg/L)	52.700	461.152	856.375
Sólidos solúveis (mg/L)	40.000	350.000	650.000
Sólidos insolúveis (mg/L)	12.700	111.125	206.375
Nitrogênio – N (mg/L)	480 – 710	4.200 – 6213	7.800 – 11.538
Fósforo – P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/L)	9 – 200	79 – 1750	146 – 3.250
Potássio – K <sub>2</sub> O (mg/L)	3.340 – 4.600	29.250 – 40.250	54.275 – 74.750
Cálcio – CaO (mg/L)	1.330 – 4.570	11.638 – 39.988	21.613 – 74.263
Magnésio – MgO (mg/L)	580 – 700	5.075 – 6.125	9.425 – 11.375
Sulfato – SO <sub>4</sub> – (mg/L)	3.700 – 3.730	32.375 – 32.637	60.125 – 60.612
Relação vinhaça/álcool	12	1,4	0,74

### 7.3.6 Aplicação da vinhaça na lavoura por veículos tanque

A aplicação da vinhaça na lavoura por caminhões tanque é a técnica mais utilizada para seu descarte, especialmente pelo seu baixo custo, pela facilidade de conservação e simplicidade dos componentes. A desvantagem é que ele não permite o controle adequado de vazão, resultando numa aplicação não uniforme, uma vez que a vazão do líquido diminui à medida que o tanque vai esvaziando. Esse sistema pode também causar compactação do solo pela movimentação dos veículos pesados. Além disso, deve ser considerada a dificuldade de aplicação da vinhaça em dias chuvosos ou em terreno de maior declividade. Para manter a vazão constante da vinhaça aplicada, pode ser acoplado um conjunto de motobomba ao caminhão tanque, possibilitando uma aplicação mais rápida e uniforme.

Na Figura 34 pode-se ver um caminhão tanque que dispõe de um conjunto de motobomba realizando a aplicação.



**Figura 34** Aplicação de vinhaça por caminhão.

### 7.3.7 Irrigação por aspersão

Outra técnica de aplicação da vinhaça na lavoura é a irrigação por aspersão. A principal limitação desse processo é a elevada corrosividade da vinhaça, que torna a vida útil dos equipamentos bastante reduzida. Muitas unidades industriais diluem a vinhaça para reduzir o seu poder corrosivo e assim viabilizar a utilização desse sistema de aplicação. Na Figura 35 pode-se ver um sistema por aspersão operando.



**Figura 35** Sistema aplicador de vinhaça por aspersão.

### 7.3.8 Distribuição de vinhaça por canais

O sistema de distribuição de vinhaça por canais é caracterizado pela dependência da localização da destilaria e da topografia da região. Esse sistema requer um elevado investimento inicial, mas o retorno é facilmente obtido. Na Figura 36 pode-se ver um canal para o transporte de vinhaça revestido com manta asfáltica, e na Figura 37 é apresentado um canal revestido com plástico. Esses revestimentos impedem a absorção da vinhaça pelo solo, que pode causar salinificação do solo ou do lençol de água em razão dos sais e do potássio.



**Figura 36** Canal para o transporte de vinhaça revestido com manta asfáltica.



**Figura 37** Canal para o transporte de vinhaça revestido com plástico.

## 7.4 Demanda de água para a produção de etanol

A produção de álcool requer uma quantidade de água para ser utilizada no processamento. Essa água é em parte obtida da própria cana, pois da matéria-prima recebida da usina cerca de 70% a 75% é composta por água, de 12% a 14% por material fibroso e o restante por material dissolvido, dos quais a sacarose é predominante. A água necessária é obtida pela captação de corpos d'água como rios, córregos, lagos etc.

Uma destilaria que processa cana para a produção exclusivamente de álcool, uma destilaria autônoma, consome em média 15.000 litros de água por tonelada de cana processada ou 200 litros por litro de álcool produzido. No caso de uma usina de açúcar que produz álcool, como é a quase totalidade das unidades brasileiras, a demanda por tonelada de cana processada é bem maior, visto que a produção de açúcar demanda mais água que a produção de álcool.

Os locais em que ocorre grande demanda de água numa destilaria de álcool são:

- a) lavagem de cana;
- b) moagem, embebição;
- c) moagem, refrigeração dos mancais da moenda;
- d) preparo do leite de cal;
- e) condensador multijato ou barométrico do filtro;
- f) condensador multijato ou barométrico da evaporação;
- g) resfriamento do caldo;
- h) resfriamento das dornas;
- i) refrigeração dos condensadores da destilaria.

A demanda de água por uma destilaria de álcool pode ser vista na Tabela 8 a seguir.

**Tabela 8** Demanda de água pelos diversos setores de uma destilaria de álcool.

Setor	Finalidade	Uso médio m <sup>3</sup> /t de cana
Alimentação	Lavagem de cana	5,330
Extração	Embebição	0,250
	Resfriamento de mancais	0,150
Tratamento do caldo	Preparo do leite de cal	0,030
	Embebição dos filtros	0,040
	Condensadores dos filtros	0,300
Concentração do caldo	Condensadores de evaporação	2,000
Geração de energia	Produção de vapor	0,500
	Resfriamento do turbo-gerador	0,200
Fermentação	Resfriamento do caldo	1,000
	Preparo do mosto	0,001
	Preparo do pé de cuba	0,001
	Resfriamento das dornas	3,000
Destilaria	Resfriamento dos condensadores	4,000
Outros	Limpeza de piso	0,050
	Uso potável	0,030

Fonte: Neto (2008).

Na prática, a água utilizada no processamento tecnológico é em grande parte reutilizada, por exemplo, na lavagem de cana, sendo necessária uma pequena reposição das perdas, e a substituição é feita somente quando o acúmulo de suspensões coloidais torna o seu tratamento pouco eficiente. A água utilizada no resfriamento das dornas, condensadores ou mancais também é reutilizada após seu resfriamento em torres de resfriamento ou piscina de aspersão.

Com a reutilização, a quantidade de água captada pelas usinas tem diminuído nos últimos anos, estando, pelos dados atuais, inferior a 2 m<sup>3</sup>/t de cana processada, como mostra a Tabela 9.

**Tabela 9** Evolução da captação e lançamento de água pelas destilarias de álcool do Estado de São Paulo.

Volume específico (m <sup>3</sup> /t. cana)	1990 <sup>(*1)</sup>	1995 <sup>(*2)</sup>	1997 <sup>(*3)</sup>	2004 <sup>(*4)</sup>
Captação	5,6	2,92	5,07	1,83
Consumo	1,8	1,60	0,92	sem dados
Lançamento	3,8	1,32	4,15	sem dados

Fonte: ELIA NETO & NAKAHODO (1995).

(\*1) Plano Estadual de Recursos Hídricos – 1994/95 (1º Plano do Estado de São Paulo – 1990 – Síntese)

(\*2) Levantamento expedito efetuado em 1995 pelo CTC com a participação de 39 usinas da Copersucar.

(\*3) Levantamento (revisão) efetuado em 1997 pelo CTC com a participação de 34 usinas da Copersucar.

(\*4) Levantamento efetuado em 2005 (dados de 2004) pela UNICA/CTC com a participação de usinas.

Em 2007, a água captada pelo setor de produção de açúcar e álcool correspondeu a 7% de toda a água captada no Estado de São Paulo. Isso corresponde a 23% de toda a demanda industrial do Estado. Esses valores, apesar de altos, indicam uma evolução, pois no ano de 1990 o setor captava 13% de toda a água captada no Estado, ou seja, quase o dobro da atual.

# **UNIDADE 8**

Projeto de uma destilaria de etanol de cana



## 8.1 Primeiras palavras

As unidades produtoras de álcool no Brasil são predominantemente usinas de açúcar que instalaram uma unidade produtora de álcool anexa. Essa unidade anexa produz o etanol processando tanto o melaço resultante da fabricação do açúcar, como parte do caldo de cana extraído nas moendas. No entanto, a maioria dessas usinas de açúcar já havia sido inicialmente uma destilaria autônoma implantada originalmente com incentivos do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), para produzir somente álcool e, posteriormente, passou a produzir açúcar.

## 8.2 Problematizando o tema

As novas unidades industriais em implantação têm seguido essa ordem, principiando como destilaria autônoma de álcool para posteriormente implantarem uma linha de produção de açúcar. Inicialmente, o projeto de uma destilaria de álcool deve atender algumas questões básicas. São elas:

- a) Onde localizar a unidade?
- b) Qual a capacidade de produção?
- c) Qual o processo tecnológico a ser adotado?

Atendida essas questões, a etapa seguinte consiste na definição dos equipamentos básicos, na realização de um balanço de massa e de energia e na elaboração de um anteprojeto. Finalmente, deverá ser realizado um projeto detalhado envolvendo projeto agrônomico, projeto das obras civis etc., que pela sua complexidade escapa ao objetivo deste livro.

## 8.3 Localização do empreendimento

A definição do local onde será implantado o projeto é a primeira etapa, e deve-se levar em conta aspectos agrônomicos, ou seja, a viabilidade econômica do cultivo da cana-de-açúcar na área escolhida. Também devem ser considerados os aspectos de logística e infraestrutura da área, que consistem em avaliar as estradas, ferrovias, portos etc., por onde o álcool será retirado e encaminhado para o mercado consumidor.

Outros aspectos que devem ser considerados são os ambientais e de zoneamento agrícola. Assim, deve-se consultar a legislação ambiental para verificar se não existe impedimento referente à implantação de canal de irrigação no local

selecionado. Recomenda-se que se consulte o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar para fazer essa certificação.

### 8.3.1 Localização: aspectos agronômicos

Inicialmente, deve-se realizar uma avaliação agronômica do local com relação aos aspectos edafoclimáticos<sup>4</sup>, verificando se existem condições de se cultivar a cana-de-açúcar de maneira econômica na área. Caso esse primeiro item seja atendido, o passo seguinte é determinar a extensão da área a ser cultivada em função da produção anual de álcool. De posse desse valor já se pode adquirir ou arrendar as áreas a serem cultivadas, tendo cuidado de não cultivar canaviais muito distantes do local em que será implantada a indústria. Outro fator importante é o transporte da cana que encarece quase linearmente em relação à distância. Dessa forma, é importante que o parque industrial esteja localizado numa posição central em relação aos canaviais. Assim, por exemplo, para uma moagem de dois milhões de toneladas de cana, recomenda-se que a distância máxima a ser percorrida pelo caminhão não ultrapasse 20 km.

Depois dessa avaliação, a próxima etapa é a implantação dos canteiros primários de mudas, utilizando variedades recomendadas por agrônomos. Deve-se também iniciar os estudos para definir os aspectos de disposição da vinhaça como agente de fertirrigação dos canaviais. Também a área escolhida deve permitir a colheita mecanizada da cana, visto que a colheita manual da cana queimada será abolida, inicialmente no Estado de São Paulo, e depois em todo o território nacional. Nesse aspecto, deve ser lembrado que as atuais colheitadeiras de cana não conseguem operar em terrenos com inclinação maior que 12%, portanto a topografia da área é muito importante.

Quanto à área dos canaviais a ser cultivada (S) em hectares, esse valor está vinculado à produção anual de álcool estipulada (P), ao rendimento industrial estimado (Ri) em litros/t de cana e ao rendimento agrícola (Ra) estimado em tonelada de cana/ha. Deve-se também considerar a porcentagem de área destinada a renovação anual dos canaviais, que é uma função do número de cortes de cana a ser adotado. Podemos assim estimar a área (S) a ser disponibilizada para a cultura como:

$$S = D/K \cdot Ra$$

em que:

- D: é a necessidade de cana em t/safra;

4 Aspectos edafoclimáticos referem-se a aspectos de clima e solo.

- Ra: rendimento agrícola em t/ha;
- k: fração da área a ser cortada anualmente, que varia em função do número de cortes. Por exemplo, para três cortes,  $k = 0,725$ , quatro cortes,  $k = 0,780$ , e cinco cortes,  $k = 0,817$ .

As necessidades anuais de cana-de-açúcar por sua vez são uma função da produção anual de álcool e do rendimento industrial estimado. Dispondo do número de toneladas de cana que se pretende moer, por exemplo, dois milhões de toneladas em regime de três cortes e com um rendimento agrícola de 70 t/ha, necessita-se da seguinte área com cana-de-açúcar:

$$S = D/K \cdot Ra = 2.000.000/0,725 \cdot 70$$

$$S = 39.409 \text{ ha}$$

A conclusão é que será necessário dispor de pouco menos de 40.000 hectares de terras no cultivo da cana.

### 8.3.2 Localização do projeto: aspectos logísticos e de infraestrutura

Um fator importante no estudo da localização do projeto refere-se aos aspectos da retirada do álcool produzido e seu encaminhamento ao destino, que pode ser uma distribuidora de combustíveis, no caso de álcool carburante; uma indústria química, no caso de álcoois finos; ou um porto, caso o destino seja a exportação.

Deve-se também considerar a existência de uma infraestrutura urbana próxima à unidade industrial, bem como uma rede de energia elétrica que possa dar suporte ao empreendimento tanto na fase de implantação como na operação. Atualmente muitas destilarias de álcool são implantadas com o objetivo de gerar grandes excedentes de energia elétrica para comercializá-los com as distribuidoras. Portanto, deve-se prever a retirada dessa energia na elaboração do projeto.

Um tópico a ser considerado na escolha do local de implantação da destilaria é a disponibilidade hídrica, ou seja, a existência de um corpo d'água como um rio ou lago que possa suprir a planta industrial. Uma destilaria bem projetada requer uma captação de 2 m<sup>3</sup> por tonelada de cana a ser processada. Esse valor é válido para uma unidade industrial moderna que pratique a reutilização das águas servidas. Destilarias mais antigas podem consumir um valor bem maior, chegando até 10 m<sup>3</sup>/t de cana.

Nesse aspecto deve-se levar em conta também as futuras ampliações do parque industrial com aumento da produção de álcool ou a instalação de uma

unidade produtora de açúcar, que apresenta um consumo de água maior que de uma unidade que produza somente álcool. Assim, deve-se localizar a planta industrial nas proximidades de um corpo d'água com vazão condizente tanto com as necessidades hídricas atuais quanto com as pretensões futuras da empresa.

#### 8.4 Aspectos ambientais e de zoneamento agrícola

Outro aspecto de grande importância a ser considerado é com relação à legislação ambiental do estado ou da região em que o projeto será implantado. Existe no Brasil um zoneamento agroecológico que estabelece regras e diretrizes para a expansão da produção de cana-de-açúcar. Para algumas áreas como a Amazônia, o Pantanal e a Bacia do Alto Paraguai, existe um projeto de lei que veta a produção de cana (ver Figura 38).

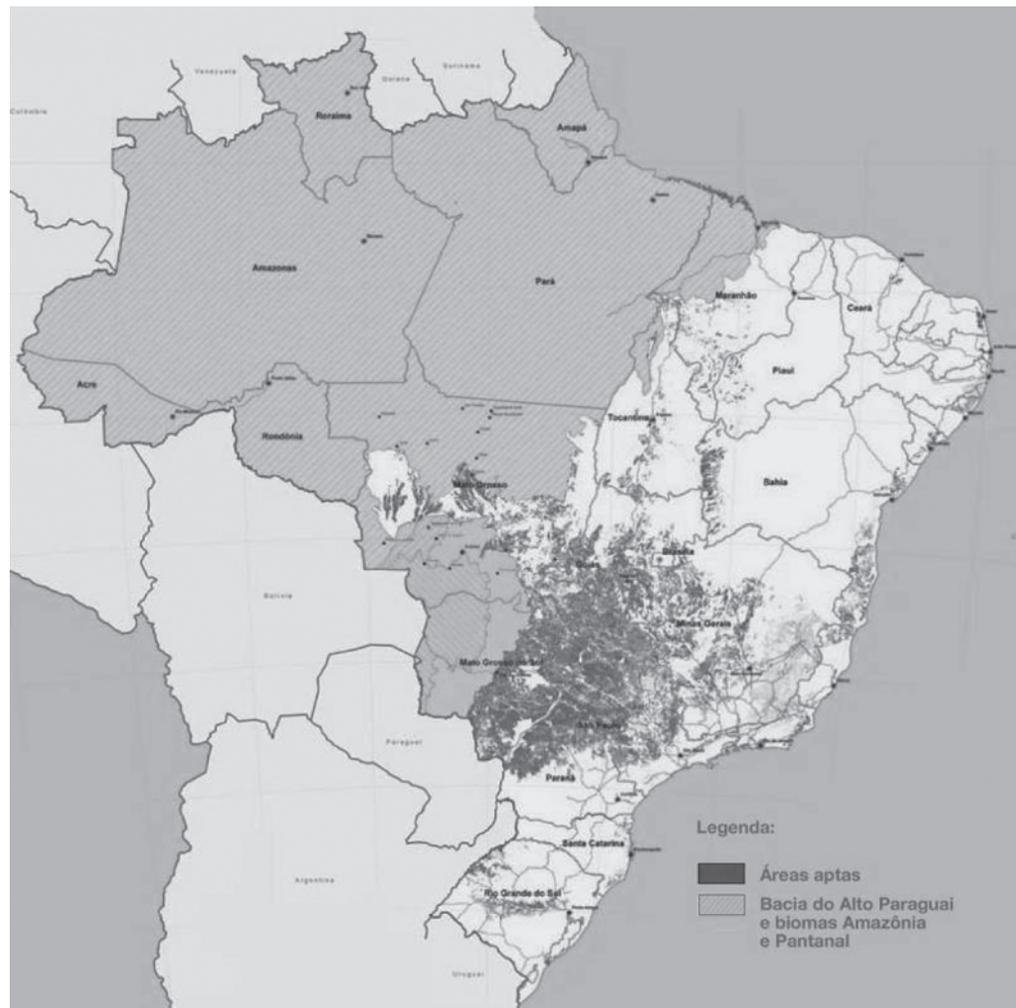


Figura 38 Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar.

## 8.5 Capacidade de produção

No aspecto da capacidade de produção de uma unidade produtora de álcool, não existem limites definidos. Na década de 1980 foram implantadas muitas unidades com capacidade de 5.000 litros por dia e que eram chamadas de microdestilarias. Também foram implantadas indústrias com capacidade superior a um milhão de litros por dia. O problema enfrentado na época pelas microdestilarias foi o baixo rendimento em litros de álcool por tonelada de cana, resultante da baixa extração das moendas. Outra questão dizia respeito à qualidade do álcool gerado nessas pequenas unidades, que não atendia às exigências da indústria automobilística e das agências governamentais. Isso acabou inviabilizando esse tipo de unidade industrial.

Atualmente, adota-se que o limite mínimo de moagem para uma unidade industrial deve ser em torno de dois milhões de toneladas de cana por safra, em razão da capacidade dos equipamentos disponíveis no mercado e desconsiderando as microdestilarias. Dessa forma podemos considerar esta unidade como um parâmetro para definir o início de um projeto. O período de safra em torno de 200 dias no Estado de São Paulo e regiões próximas pode ser considerado. Normalmente se tem um “tempo de aproveitamento”, que corresponde aos dias de safra em que efetivamente se processa a cana, variando de um mínimo de 80% a um máximo de 90%. Assim, para uma safra de 200 dias o período efetivo de processamento será de 160 dias (80%) a 180 dias (90%).

Uma destilaria que processe dois milhões de toneladas de cana por safra de 200 dias, com um aproveitamento de 85%, processará efetivamente 170 dias por safra ou:

$$2.000.000/170 = 11.765 \text{ toneladas de cana por dia}$$

$$11.765/24 = 490 \text{ toneladas de cana por hora}$$

Considerando um rendimento industrial de 78 litros de álcool por tonelada de cana, a indústria terá a seguinte produção:

$$11.765 \times 78 = 917.670 \text{ litros de álcool por dia}$$

### 8.5.1 Processo tecnológico a ser adotado: operações preliminares

No fluxograma básico de uma destilaria de álcool, que é composto pelas operações de extração do caldo, tratamento, fermentação e destilação/desidratação,

geração de vapor, existem muitas opções tecnológicas que podem ser feitas em função do tipo de produto, da localização da destilaria etc.

O início do processo industrial de fabricação de álcool é a recepção da cana. Normalmente as usinas de açúcar e destilarias de álcool recebiam a cana somente durante o dia, pois o corte manual ocorria nesse período. Assim, era previsto um barracão ou pátio com finalidade de armazenar uma quantidade suficiente de cana para que a usina funcionasse no período noturno (aproximadamente 12 horas) e quando, por motivos climáticos, o fornecimento fosse interrompido.

Hoje com o corte mecânico da cana, muitas vezes em toletes de 20cm, iniciou-se a prática do corte noturno, possibilitando a indústria processar a matéria-prima tão logo seja recebida, com um estoque mínimo de cana, em geral, nos próprios veículos transportadores. Com isso se pode dispensar grandes barracões de cana.

A operação seguinte era a lavagem de cana, processo que se generalizou quando a cana passou a ser queimada e carregada na máquina na década de 1970. Esse procedimento não é recomendado para canas colhidas à máquina ou picada. Hoje só se realiza o processo de lavagem de cana quando o teor de impureza mineral ultrapassar 1% da cana.

Recentemente começou a ser adotado um processo de limpeza da cana em que se aplica um jato de ar de alta velocidade (mais de 20 m/s), eliminando a necessidade de aplicar água na limpeza. Esse sistema traz alguns problemas em canas colhidas em solo arenoso ou em épocas chuvosas.

### 8.5.2 Processo tecnológico a ser adotado: extração do caldo

Na operação de extração do caldo existem dois processos tecnológicos competindo, desde a década de 1950, que são os sistemas por moagem e por difusor. Assim, ao projetar uma nova unidade ou mesmo expandir uma destilaria já existente, deve-se estudar essas duas possibilidades, avaliando as vantagens e desvantagens de cada uma.

O sistema por difusor é, na prática, um sistema de lixiviação em que a sacarose é extraída pela lavagem das células abertas da cana.

**Quadro 3** Vantagens e desvantagens do difusor quando comparado ao sistema de moagem.

Vantagens do difusor	Desvantagens do difusor
maior extração da sacarose	pouca flexibilidade operacional e pouco tolerante a variações de processamento
consumo menor de energia	exigência do apoio técnico maior
o caldo gerado é parcialmente tratado	o caldo apresenta maior presença de precursores de cor, no caso de se produzir também açúcar
por operar em ambiente fechado tem aspecto mais limpo e higiênico	
processo mais automatizável	
manutenção mais simples	

**Quadro 4** Estudo comparativo do sistema de extração por moagem.

Vantagens da moenda	Desvantagens da moenda
maior flexibilidade operacional	equipamento grosseiro e anti-higiênico
operação sem grande apoio técnico	pouco eficiente (baixa extração)
modular, podendo ser ampliada à medida que a moagem cresce	manutenção mais cara

### 8.5.3 Processo tecnológico a ser adotado: fermentação e destilação

Atualmente, no setor de fermentação de destilaria de álcool existem duas tecnologias disponíveis: a fermentação em bateladas e a fermentação contínua. Essas duas técnicas apresentam vantagens e desvantagens que devem ser analisadas por ocasião da definição do processo tecnológico.

Na década de 1990 o processo de fermentação contínua começou a atrair os projetistas de destilaria, principalmente por exigir volume menor de dornas, além do fato de os processos contínuos possuírem maior facilidade de automação. No entanto, esse processo tem apresentado desvantagens, como o rendimento de fermentação inferior ao processo em bateladas. Outra desvantagem é que as dornas são interconectadas, e assim os processos infecciosos têm mais facilidade para se propagarem. Nos projetos mais recentes nota-se um retorno ao processo descontínuo.

Como já visto anteriormente, na operação de destilação existem três processos de desidratação que devem ser analisados previamente, em especial

nos aspectos de custo, consumo de energia, gasto com insumos e destino do produto final (álcool anidro para uso como combustível, exportação etc.). A avaliação desses processos já foi visto anteriormente.

## 8.6 Dimensionamento dos equipamentos

A capacidade dos equipamentos utilizados no setor alcooleiro é definida em tonelada de cana por hora (grafado em muitas literaturas como TCH), ou em alguns casos em tonelada de cana por dia (TCD). O setor de fermentação e destilação é dimensionado em função da produção em litros de álcool por hora ou por dia. Pode-se calcular a moagem média diária e horária da unidade industrial em função da moagem de cana por safra, dos dias de safra e do tempo de aproveitamento. Pelo conhecimento do rendimento industrial médio estimado, pode-se prever a produção de álcool, seja diária ou por safra.

### 8.6.1 Rendimento industrial em álcool

O rendimento industrial (RI) em álcool é estimado em função do teor de ART na cana (kg/t), do fator estequiométrico de conversão de açúcar em álcool (0,6479 litros de etanol absoluto por kg de hexose) e dos rendimentos do processo de produção de álcool, que seriam:

- RI: rendimento da lavagem da cana;
- Re: rendimento da extração;
- Rf: rendimento da fermentação;
- Rd: rendimento da destilação;
- Ri: rendimento em função das perdas indeterminadas.

O RI pode ser apresentado na forma de equação:

$$\text{RI (litros/t)} = 0,6479 \cdot (\text{ART cana}) \cdot \text{RI} \cdot \text{Re} \cdot \text{Rf} \cdot \text{Rd} \cdot \text{Ri}$$

Se, por exemplo, fixarmos o teor de ART da cana em 140 kg/t de cana e estimarmos os valores dos rendimentos:

- RI = 0,98
- Re = 0,98
- Rf = 0,89

- $R_d = 0,99$
- $R_i = (0,98)$
- $RI \text{ (litros/t)} = 0,6479 \cdot (140) \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,89 \cdot 0,99 \cdot 0,98$
- $RI = 75,2 \text{ litros/t}$

## 8.6.2 Extração do caldo

Após a seleção dos processos tecnológicos a serem adotados no projeto da destilaria, o passo seguinte consiste no dimensionamento dos equipamentos que serão utilizados. Os equipamentos básicos são:

- sistema de preparo da cana e seu acionamento;
- moenda (e seu acionamento) ou difusor;
- dornas de fermentação;
- centrífuga de vinho;
- aparelho de destilação;
- caldeiras geradoras de vapor;
- geradores de energia elétrica;
- reservatórios de álcool.

Se no projeto a opção for pela utilização de moenda para a extração do caldo, então deve-se selecionar o equipamento dentre os disponíveis. A capacidade de uma moenda é definida pelos seguintes parâmetros:

- dimensão dos rolos (proporcional a largura do rolo e ao quadrado de seu diâmetro);
- proporcional à raiz quadrada do número de ternos;
- proporcional à velocidade angular dos rolos até um limite;
- proporcional ao preparo da cana pelo desfibrador;
- inversamente proporcional ao teor de fibra na cana.

A Tabela 10 indica a capacidade de algumas moendas disponíveis no mercado, segundo informação do fabricante e considerando que a cana-de-açúcar processada apresenta um teor de fibra de 13% e safra de 180 dias:

**Tabela 10** Capacidade das principais moendas disponíveis no mercado.

Dimensão dos rolos em pol	Capacidade de processamento		
	t/hora	t/dia	t/safra de 180 dias
37 × 66	400	9.600	1.728.000
42 × 78	600	14.400	2.592.000
46 × 84	750	18.000	3.240.000
46 × 90	850	20.400	3.672.000
50 × 96	1000	24.000	4.320.000

Fonte: adaptada de Dedini (2011).

Considerando uma destilaria autônoma de álcool programada para processar dois milhões de toneladas de cana por safra e que optasse por moenda no setor de extração, pela Tabela 10 deveria se implantar um conjunto de 42 × 78 pol. Inicialmente a moenda deveria ser constituída por quatro ternos, cuja moagem se aproximaria desse valor. Posteriormente, procurando uma melhor extração de sacarose ou em caso de expansão de moagem, poderiam ser instalados mais dois ternos, elevando a capacidade do novo conjunto para valores próximo a 2,6 milhões de toneladas por safra.

Após o dimensionamento e a seleção da moenda, deve-se dimensionar o sistema de seu acionamento. Atualmente existem dois sistemas predominantes para esse acionamento. São eles:

- a) acionamento por turbina a vapor acoplada a um sistema redutor de velocidade;
- b) acionamento por motor elétrico.

O sistema de acionamento por motor elétrico tem ganhado adeptos principalmente nas indústrias que pretendem gerar excedentes de energia elétrica para comercialização (cogeração) em função da sua maior eficiência em comparação com as turbinas a vapor.

O acionamento das moendas requer de 8 a 12 kW por tonelada de fibra processada por hora. Ou seja, para uma cana com 13% de fibra, as necessidades de potência no acionamento são:

$$\frac{100 \cdot 8}{13} = 61,5 \text{ kW/t de cana por hora}$$

$$\frac{100 \cdot 12}{13} = 92,3 \text{ kW/t de cana por hora}$$

O consumo estaria dentro do intervalo de 61,5 a 92,3 kW/TCH.

O sistema de extração adotado for o de difusor tem tido uma aceitação crescente no Brasil, notadamente por consumir menos potência que a moenda, sendo então mais adequado para destilarias que pretendem coogerar energia elétrica, como também pela menor exigência em manutenção.

A capacidade de um difusor está correlacionada diretamente com a largura do equipamento. Por exemplo, a capacidade de um difusor processando cana com 13% de fibra é de 40 (capacidade nominal) a 50 (capacidade de pico) toneladas de cana por hora por metro de largura do equipamento. Esses dados são para os difusores de cana que processam a matéria-prima diretamente. Um difusor de bagaço, que dispõe de um terno de moenda na entrada, apresenta uma capacidade de processamento 35% maior.

### 8.6.3 Fermentação

As dornas de fermentação são dimensionadas em função do volume de vinho que processam, do teor alcoólico do vinho e do tempo médio de fermentação, conforme a seguir:

$$D = (1 + k)(P + M)tf$$

em que

- D: volume das dornas em litros;
- k: adicional de volume para compensar as perdas por espuma, em fração decimal;
- P: vazão de pé de cuba em litros/hora;
- M: vazão de mosto em litros/hora;
- tf: tempo médio de ocupação das dornas em horas.

No setor de fermentação, além das dornas, têm-se as cubas de pré-fermentação, que é o equipamento que recebe o leite de levedura separado nas centrífugas e uma adição de água na razão de 1 para 1 ou 1 para 2 para a diluição do leite. Nesse equipamento é também adicionado o ácido sulfúrico para baixar o pH para valores em torno de 3. O volume desse equipamento (C) é uma função da vazão do pé de cuba (P) em L/h e o tempo de retenção no mesmo (tc):

$$C = P \cdot tc$$

#### 8.6.4 Destilaria

O aparelho de destilação é um dos componentes mais caros de uma destilaria. Seu dimensionamento é realizado em função da moagem da cana na safra, dos dias efetivos de produção, e do rendimento industrial em litros por tonelada de cana. Para uma moagem de 2 milhões de toneladas em 180 dias efetivos de processamento e com um rendimento industrial de 78 litros por tonelada de cana, teremos:

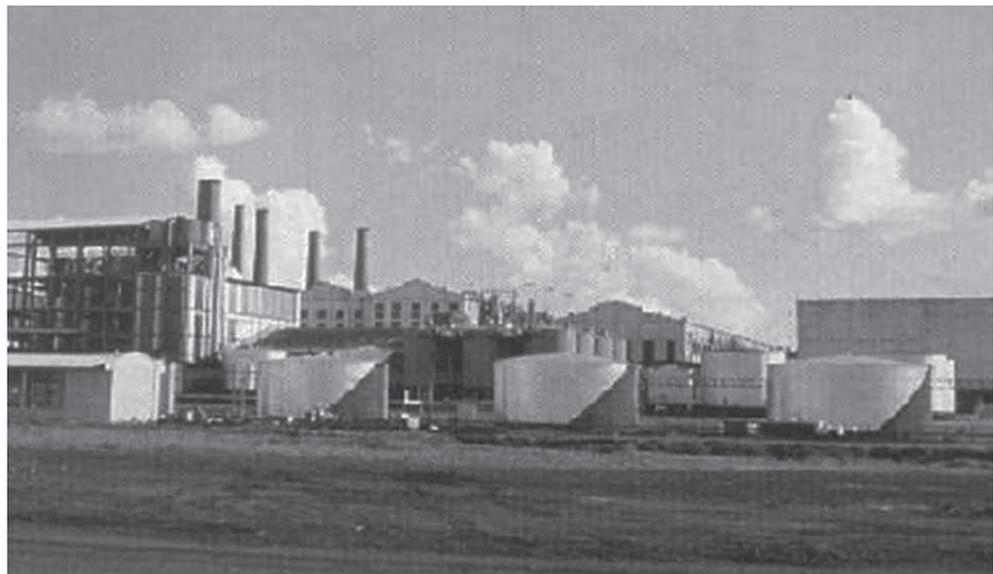
$$\text{Produção diária de álcool} = 78 \cdot 2.000.000/180$$

$$\text{Produção diária de álcool} = 866.667 \text{ L}$$

### 8.7 Armazenagem de etanol

O álcool produzido, seja hidratado ou anidro, é quantificado por meio de medidores de vazão ou tanques calibrados e enviado para armazenagem em reservatórios de grande volume situados no parque de tanques, onde aguardam sua remoção por caminhões tanque.

Os tanques de álcool são de formato cilíndrico construídos em chapas de aço carbono e com capacidade para 5, 10 ou até 20 milhões de litros, conforme pode ser visto na Figura 39.



**Figura 39** Parque de armazenagem de álcool.

Na montagem de tanque de combustível devem ser considerados alguns cuidados em razão do alto risco de incêndio no local de armazenagem. Existe

uma série de normas sobre localização dos dispositivos contra incêndio que deve ser seguida. Um exemplo são os tanques que precisam ser cercados por um dique que possibilite conter um volume de álcool igual a sua própria capacidade máxima de armazenagem.

Para o dimensionamento do volume de reservatório necessário em uma destilaria deve-se levar em conta a operação durante o período de safra da cana, que na região do Estado de São Paulo vai de abril ou maio até novembro. Por outro lado, a comercialização do álcool ocorre ao longo de todo o ano. Assim, durante a safra forma-se um estoque que atinge um máximo no final.

A norma geral é que a usina tenha uma capacidade de tancagem igual a sete doze avos de sua capacidade. Podemos estimar a capacidade de armazenagem da seguinte maneira:

$$A = P \left( 1 - \frac{d}{365} \right)$$

em que

- A: capacidade de armazenagem em m<sup>3</sup>;
- d: dias corridos de safra no ano;
- P: produção anual de álcool em m<sup>3</sup>.

Exemplificando, vamos considerar uma destilaria que produz 240 m<sup>3</sup> de álcool/dia numa safra de 200 dias, ou 48.000 m<sup>3</sup>/ano. A sua capacidade ideal de tancagem é:

$$A = P \left( 1 - \frac{d}{365} \right) = 48.000 \left( 1 - \frac{200}{365} \right) = 21.699 \text{ m}^3$$

Além dos problemas de segurança em razão dos riscos de incêndio, deve-se ter cuidado especial para evitar as perdas do álcool, pois, como todo produto volátil, ele passa ao estado de vapor saturando o ar no espaço livre do tanque acima da superfície do líquido. Assim, se esse volume livre for muito grande, ou seja, se o reservatório estiver semicheio, grande quantidade de álcool pode evaporar e saturar a atmosfera nesse espaço. Por uma elevação da temperatura, esse ar saturado de álcool pode se expandir e sair pelo respiro do tanque e se perder na atmosfera.

Uma forma de minimizar essas perdas é manter o tanque o mais cheio possível. Tanques ocupados com 30% ou menos de sua capacidade podem apresentar altas perdas, superior a 1% ao ano.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). Resolução nº 36, de 6 de dezembro de 2005. Diário Oficial da União, 07 dez. 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Balanço Nacional da Cana-de-açúcar e Agroenergia. Brasília: 2007.

CABELLO, C. Seminário de integração de pesquisas do Cerat. In: SEMINÁRIO DE INTEGRAÇÃO DE PESQUISAS DO CERAT, 3., 2005, Botucatu. Anais... Botucatu: Cerat/Unesp, 2005. 37 p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. 2006. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4\\_231.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf)>. Acesso em: 24 jan. 2011.

COPERSUCAR. Manual de métodos para análises de açúcar. Divisão Central de Laboratório de Análise e Controle de Qualidade – CTTI 5, Centro de Tecnologia da Copersucar. 1. ed. 2002. (24 documentos).

DEDINI. Concentração de Vinhaça: Tecnologia T.A.S.T.E. *Thermanally Accelerated Short Time Evaporator*. Disponível em: <<http://200.171.30.251/PDF%2011%20sba/Dedini.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2011.

LOPES, C. H. Glossário de termos técnicos para a indústria sucroalcooleira. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1986.

LOPES, C. H.; GABRIEL, A. V. M. D. Tecnologia de Produção de Açúcar. São Carlos: EdUFSCar, 2010.

MACEDO, I. C. Situação atual e perspectivas do etanol. Estudos avançados. São Paulo, v. 21, n. 59, p. 157-165, 2007.

MEIRELESS, A. J. A. Expansão da produção de bioetanol. FEA/Unicamp. Disponível em: <[http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/workshop-etanol\\_antonio-meirelles.pdf](http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/workshop-etanol_antonio-meirelles.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2011.

NETO, A. E. Água na Indústria de Cana-de-açúcar. In: WORKSHOP PROJETO PPP ASPECTOS AMBIENTAIS DA CADEIA DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR. São Paulo, 2008. (Painel 1).

NETO, A. E.; NAKAHODO, T. Caracterização físico-química da vinhaça. Projeto nº 9.500.278. Piracicaba, 1995. 26 p. (Relatório técnico da seção de tecnologia de tratamento de águas do centro de tecnologia Copersucar).

TECNIPLAS. Torres de resfriamento. Disponível em: <<http://www.tecniplas.com.br/2009/torres.asp>>. Acesso em: 17 fev. 2011.

### Referências consultadas

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço energético nacional 2007: ano base 2006. Rio de Janeiro: EPE, 2007. Disponível em: <[http://www.ben.epe.gov.br/downloads/ben2007\\_versão\\_completa.pdf](http://www.ben.epe.gov.br/downloads/ben2007_versão_completa.pdf)>. Acesso em: 11 abr. 2011.



## **SOBRE OS AUTORES**

### **Cláudio Hartkopf Lopes**

Engenheiro químico pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), Mestre em Ciências e Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (USP) de Piracicaba, SP. Professor no Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

### **Afra Vital Matos Dias Gabriel**

Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Mestre em Agroecologia e desenvolvimento rural da UFSCar, campus de Araras, SP. Técnica de biologia da UFSCar.

### **Maria Teresa Mendes Ribeiro Borges**

Bacharel em química pela USP, Mestre em Química Analítica pela USP de São Carlos e doutora em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Professora do Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Socioeconomia Rural do Centro de Ciências Agrárias da UFSCar.

