

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”**  
**DEPARTAMENTO DE AGROINDÚSTRIA, ALIMENTOS E NUTRIÇÃO**

**FUNDAMENTOS DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA**

**Apostila da disciplina LAN 1458 – Açúcar e Álcool**

**Giovanni Casagrande Silvello**

**Mariana Costa de Castro**

**André Ricardo Alcarde**

**Piracicaba**

**2020**

## 15. MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE ETANOL

O etanol pode ser produzido a partir de matérias-primas amiláceas (mandioca, batata-doce, milho e outros grãos), celulósicas (madeiras e resíduos agrícolas, dentre os quais se inclui o bagaço da cana-de-açúcar) e sacarinas (cana-de-açúcar, sorgo sacarino e beterraba) (Figura 33).

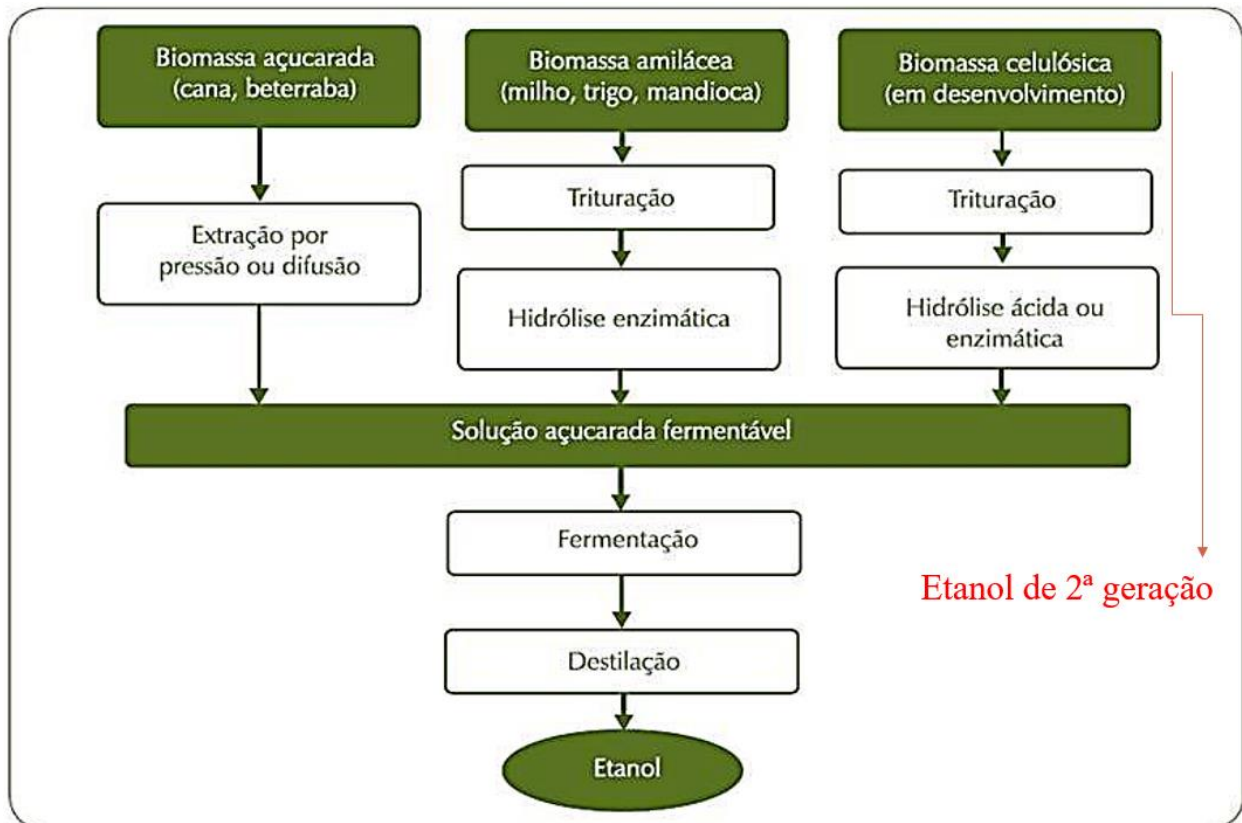


Figura 33. Processo simplificado de produção de etanol a partir de diferentes matérias-primas.

As matérias-primas amiláceas e celulósicas diferem das sacarinas por não possuírem açúcares diretamente fermentescíveis, requerendo uma etapa de conversão dos polímeros de glicose em moléculas simples deste carboidrato.

As matérias-primas utilizadas para a produção de etanol devem apresentar as seguintes características:

- elevado teor de glicídios
- preço satisfatório
- proximidade à indústria
- potencial agrônomo de cultivo em grande escala
- conhecimento dos processos para sua industrialização

As matérias-primas amiláceas se constituem dos grãos de cereais e as feculentas são as raízes e os tubérculos, sendo que o principal carboidrato presente nestas matérias-primas é o amido. A forma bruta é  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , a qual deve previamente sofrer sacarificação por via ácida ou enzimática (Figura 34) para ser fermentado.

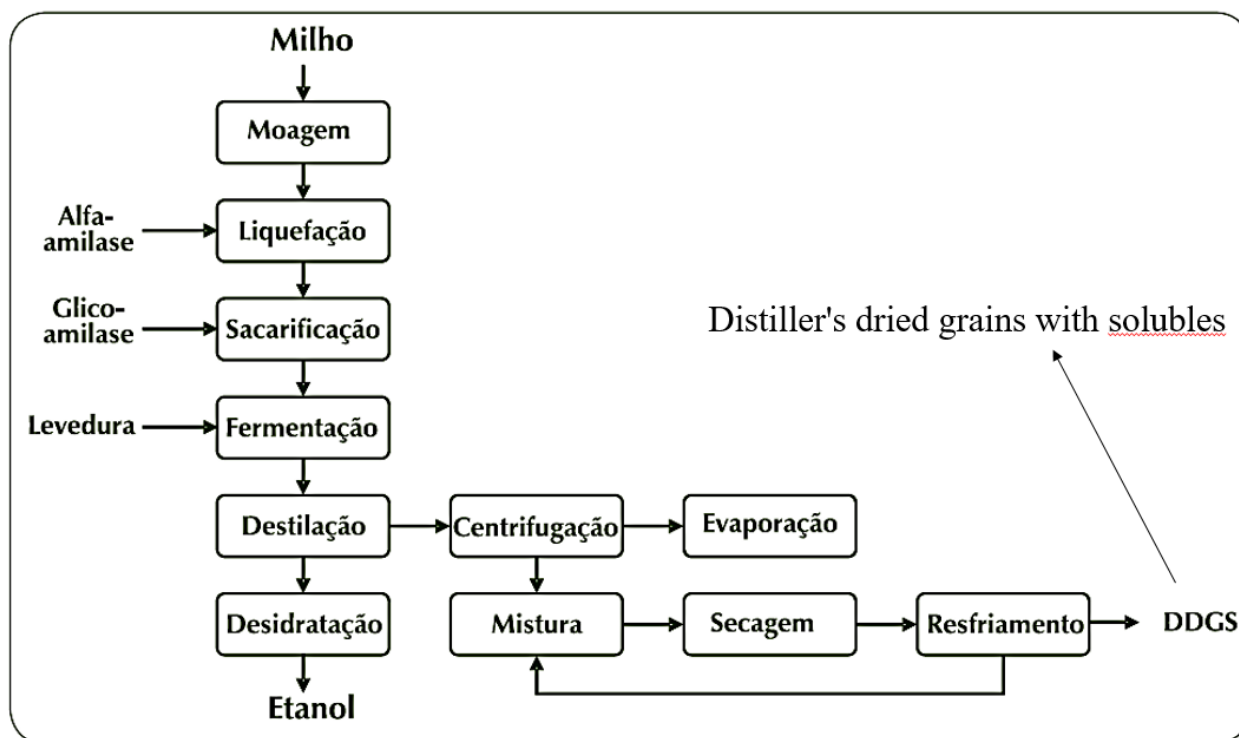


Figura 34. Processo de produção de bioetanol de milho.

Inicialmente é feita uma preparação do material (limpeza, lavagem, moagem e preparo da suspensão) visando aumentar a superfície de contato e, assim, facilitar a ação dos agentes sacarificantes e do calor, tornando mais eficientes as operações subsequentes de cozimento (aquecimento visando promover a liberação do amido), hidrólise (onde ocorre a conversão das dextrinas em glicose (açúcar fermentescível) e fermentação. Posteriormente as etapas de destilação e retificação concentram a mistura hidralcoólica em etanol. O resíduo da destilação é centrifugado e seco, gerando o DDGS, utilizado como fonte proteica para alimentação animal.

As matérias-primas celulósicas são de difícil degradação em virtude de sua configuração específica, isto é, da estrutura cristalina da celulose e da ação protetora da lignina. Há necessidade destes materiais serem submetidos a diversos tipos de pré-tratamentos para que possam ser obtidos açúcares fermentescíveis a velocidade e rendimento satisfatórios.

A forma bruta da celulose também é  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , a qual deve sofrer sacarificação ácida, que é mais viável, ou enzimática para ser transformada em etanol. A hidrólise ácida, que utiliza ácido sulfúrico ou clorídrico, possui a desvantagem do baixo rendimento em etanol da



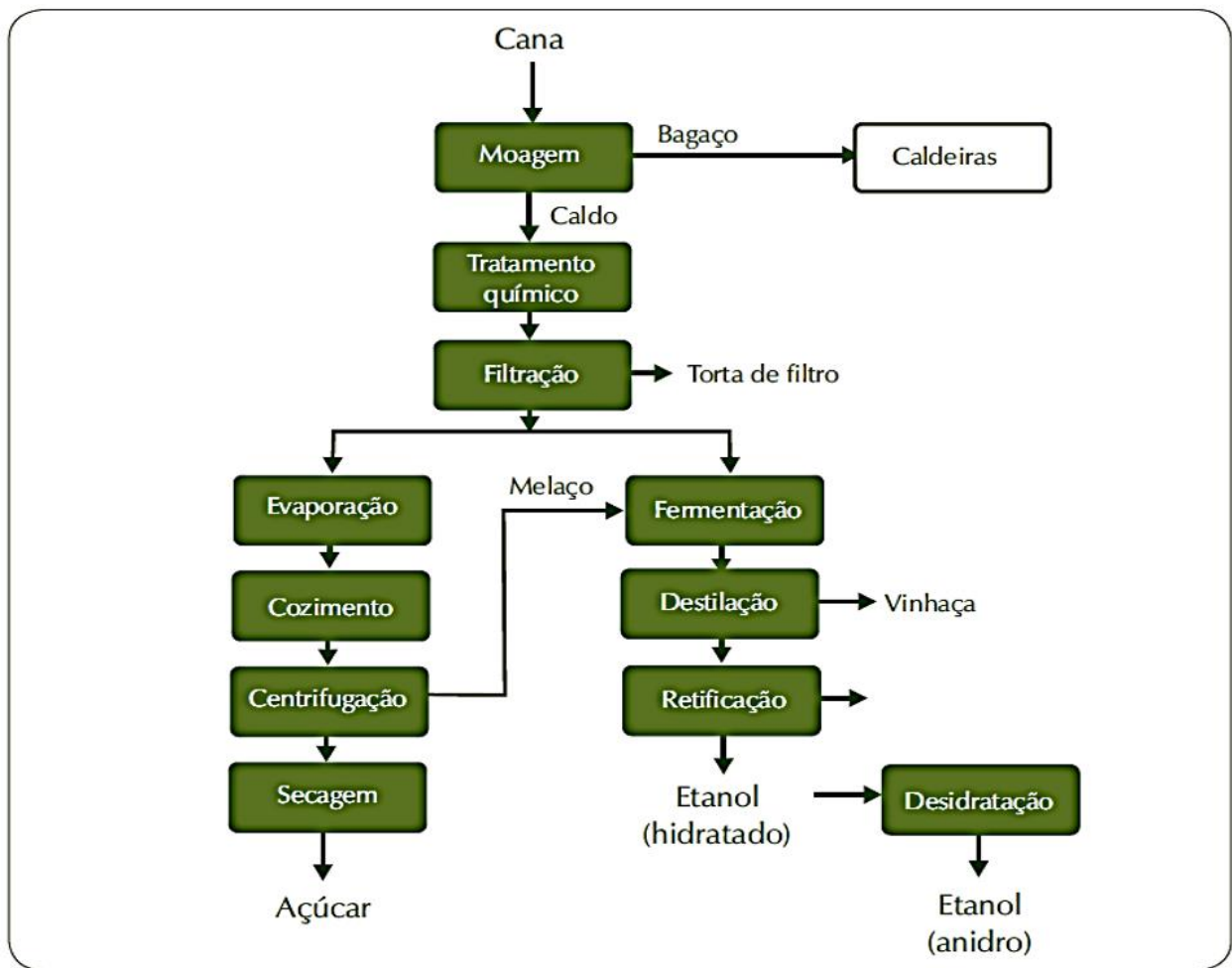


Figura 35. Esquema geral da produção de açúcar e etanol em unidades sucroenergéticas industriais.

Com relação à conservação das matérias-primas utilizadas para produção de etanol, é importante que a cana seja industrializada no máximo de 24 a 48 horas após seu corte, dependendo se foi colhida em toletes ou inteira. Já os grãos podem ser conservados por longo período, com especial atenção à degradação por insetos; as raízes em temperaturas amenas e os compostos celulósicos longe de umidade.

## 16. AGENTES DA FERMENTAÇÃO ALCÓOLICA – AS LEVEDURAS

As leveduras são fungos da classe dos Ascomicetos e a principal espécie para a produção de etanol é a *Saccharomyces cerevisiae*. Leveduras são células eucarióticas, com núcleo definido e organelas com funções específicas, porém sem locomoção própria.

A célula de levedura pode apresentar as formas esférica, ovalada ou alongada. Entretanto, a forma da célula não é uma característica de uma dada espécie, pois a espécie pode, ao longo do seu desenvolvimento, apresentar células com formatos diferentes. As dimensões das leveduras variam de 3 a 7  $\mu\text{m}$  de largura e 5 a 16  $\mu\text{m}$  de comprimento.

As microestruturas da célula da levedura (Figura 36) são:

- parede celular: tem a função de proteção e contém as enzimas de invertase da sacarose
- membrana citoplasmática: tem as funções de seletividade à entrada de nutrientes do meio de crescimento e proteção contra saída de compostos de baixo peso molecular
- núcleo: contém o DNA e RNA da célula
- vacúolos: são vesículas arredondadas com a finalidade de armazenamento de nutrientes, enzimas e energia
- mitocôndria: tem a função de conversão aeróbica de energia. Sob condição de fermentação as mitocôndrias se reprimem transformando-se em pró-mitocôndria, com cristas pouco desenvolvidas e com reduzida capacidade respiratória
- citoplasma: é a matriz das organelas e o local das reações da fermentação alcoólica

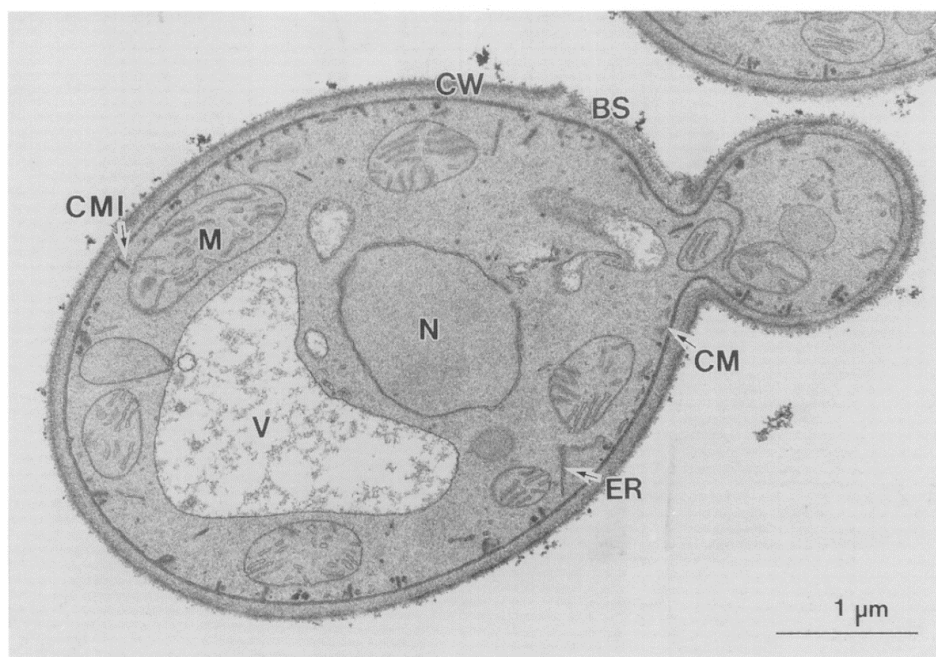


Figura 36. Microestruturas da célula de levedura.

A bio-transformação da matéria-prima em etanol é efetuada por microrganismos, usualmente leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae*, através da fermentação alcoólica.

Para que a fermentação tenha uma condução satisfatória, dentro dos aspectos técnicos, deve-se inocular no mosto uma quantidade de leveduras capaz de converter os açúcares em etanol e gás carbônico. Estas células de leveduras inoculadas denominam-se pé-de-cuba ou simplesmente fermento.

Em certas regiões é comum ocorrer o processo fermentativo sem a adição das leveduras ao mosto. Isto é observado nas pequenas indústrias de aguardente e deve-se à presença de leveduras “selvagens” no caldo de cana. No entanto, estas fermentações são totalmente heterogêneas, inconsistentes, sem controle técnico, demoradas e podem produzir produtos secundários indesejáveis.

Para serem utilizadas na indústria do etanol e da aguardente as leveduras devem apresentar certas características, tais como: velocidade de fermentação, tolerância ao etanol, rendimento, resistência e estabilidade.

As leveduras que apresentam tolerância a altos teores de etanol permitem a obtenção de vinhos de maior riqueza alcoólica e, conseqüentemente, um maior rendimento dos aparelhos de destilação, além de menor possibilidade de infecção, visto que o etanol é um antisséptico natural. Além disso, as leveduras industriais devem proporcionar um elevado rendimento de transformação de açúcar em etanol, ser resistentes à acidez e apresentar estabilidade genética da linhagem.

A reprodução da célula de levedura pode ser:

- por brotamento (gemulação): reprodução assexuada, onde a célula mãe, por brotamento, origina uma célula-filha. Todas as organelas da célula mãe são divididas e passadas à célula-filha. Uma célula mãe origina em média 24 células filhas durante o seu ciclo de vida, sendo o brotamento sempre em locais diferentes da parede celular, deixando uma cicatriz de brotamento no local (Figura 37).
- esporulação (sexuada): através de esporos sexuais, permitindo a recombinação genética e a evolução através de melhoramento genético. A produção de esporos acontece apenas em condições aeróbicas ou sob condições estressantes. Os ascósporos podem ser produzidos sob condições de alta concentração de etanol, altas temperaturas ou carência nutricional, por serem mais resistentes que as células vegetativas. Mesmo assim, são extremamente raros em condições normais de fermentação.

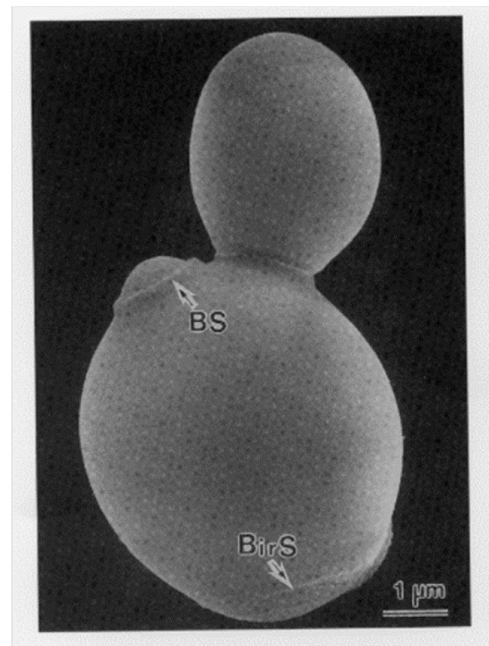
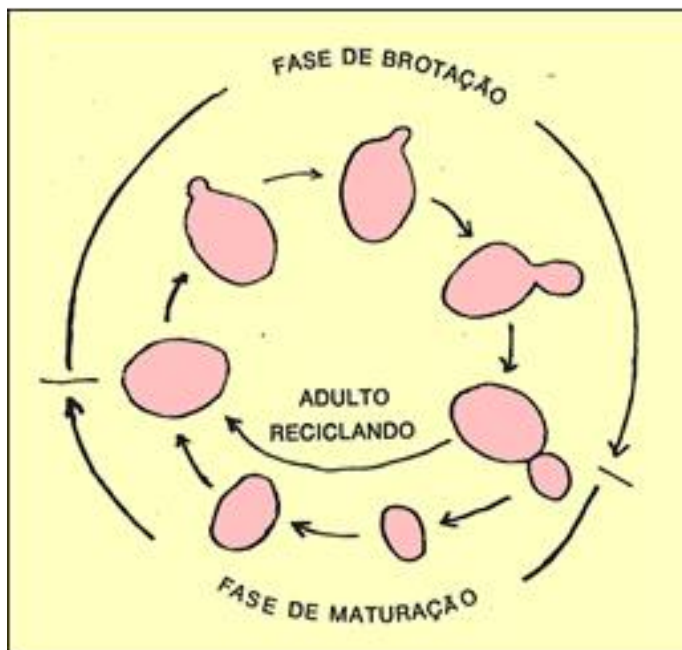


Figura 37. Reprodução da levedura por brotamento.

### 16.1. CINÉTICA DO DESENVOLVIMENTO DAS LEVEDURAS

Utilizamos os termos desenvolvimento ou crescimento para referirmos ao aumento populacional consequente da multiplicação celular e não propriamente ao aumento dimensional ou em volume de uma célula.

A cinética do crescimento de leveduras pode ser melhor compreendida por meio de um exemplo: um pequeno número de células é inoculado em um volume relativamente grande de meio contendo os nutrientes e sob condições ótimas de temperatura, pH, aeração e agitação. Assim, podem ser reconhecidas as seguintes fases de crescimento: fase inicial ou lag-fase (1), fase de aceleração do crescimento (2), fase exponencial (3), fase de desaceleração do crescimento (4), fase estacionária (5) e fase de declínio (6) (Figura 38).

A fase inicial (lag-fase) começa quando as células de leveduras são inoculadas em um novo meio e, neste período, o número de células totais e viáveis permanece constante. Trata-se de uma fase de adaptação das leveduras ao novo meio.

A fase de aceleração do crescimento, caracterizada pelo aumento gradual de velocidade de multiplicação celular, é consequência das diferentes capacidades individuais dos microrganismos em se adaptarem ao meio e atingirem, individualmente, sua máxima atividade metabólica em tempos diferentes.

A fase exponencial de crescimento (log-fase) tem início após a fase de aceleração, ocasião em que se inicia um aumento exponencial do número de células devido à população ter



atingido a velocidade máxima de crescimento, sendo que cada célula se divide em intervalos constantes de tempo. O tempo que as leveduras levam para se duplicar denomina-se tempo de geração e este é mais ou menos constante para cada cultura. Nesta fase também é observada a máxima produtividade de etanol.

A duração da fase exponencial é controlada pela composição e estado físico do meio, bem como pelo número de células por unidade de volume. O acúmulo de metabólitos e produtos finais acarretam inibição à multiplicação. Após um certo tempo, dependendo da linhagem da levedura e das condições do meio, o período de crescimento exponencial tende a um final.

Inicialmente a velocidade de multiplicação tende a diminuir até que o número de células permaneça quase constante por um considerável período. Na realidade o que acontece é um baixo consumo de energia, somente para a manutenção da viabilidade até o esgotamento das reservas nutricionais, quando se inicia o processo de morte. Esta é a fase estacionária.

A rapidez com que as células morrem ou sobrevivem é ditada pela composição do meio (esgotamento de nutrientes, acúmulo de produtos finais, etc), pelas condições físicas e químicas do meio (pH, temperatura, acidez, etc) e pela população de células ativas. Por vezes, devido à autólise das células, os sobreviventes podem aproveitar os nutrientes liberados ao meio e se multiplicar, aumentando esta fase. Por fim, as células que sobreviveram até aqui, podem entrar num novo estágio do seu ciclo vital, podendo formar ascósporos.

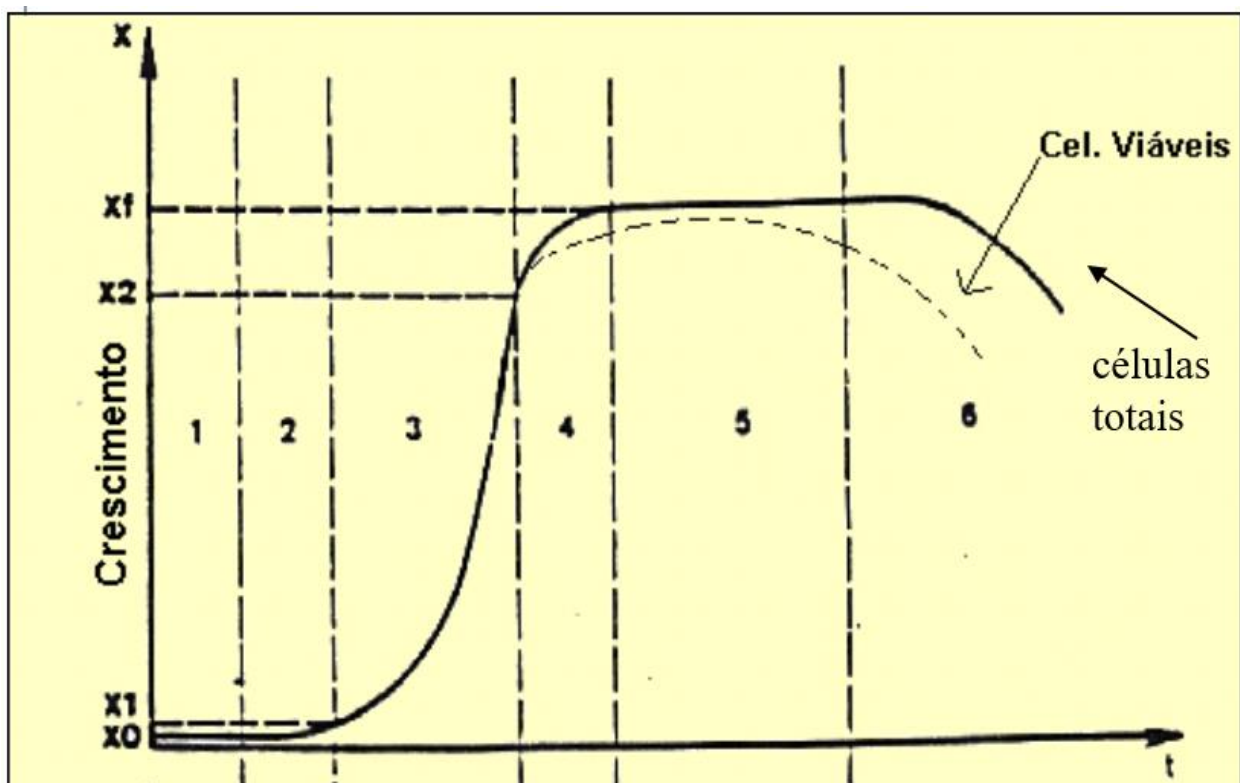


Figura 38. Fases de crescimento das leveduras.

Em processo industrial de fermentação alcoólica, a fermentação preliminar ou pré-fermentação define a Fase lag de crescimento microbiano e se caracteriza por pequena elevação de temperatura, multiplicação do fermento e pequena produção de etano. A fermentação principal ou tumultuosa define a Fase log e se caracteriza por elevação da temperatura, produção de etanol, intenso desprendimento de CO<sub>2</sub>, formação de espumas, atenuação do Brix do mosto e elevação da acidez do vinho pela produção de ácidos oriundos do metabolismo das leveduras. A fermentação complementar ou pós-fermentação define a fase estacionária e se caracteriza pela tranquilidade na superfície do vinho, tendência de equiparação da temperatura do vinho à do ambiente e incremento da acidez do vinho devido ao desenvolvimento bacteriano.

## 16.2. FISILOGIA DAS LEVEDURAS

A atividade celular é uma sequência ordenada de reações bioquímicas controladas por enzimas. O metabolismo das leveduras é resultante de dois processos fundamentais: o catabolismo ou desassimilação, que é a degradação do substrato, e o anabolismo ou assimilação, que é a síntese de material celular. As reações químicas associadas ao catabolismo são exergônicas, ocorrendo, portanto, a liberação de energia na utilização do substrato. Esta energia liberada será utilizada para a síntese de material celular.

Os fenômenos catabólicos são a respiração e a fermentação. A respiração é uma oxidação biológica de substratos orgânicos, onde atuam enzimas que catalisam a oxidação, finalizando com o transporte de elétrons na cadeia respiratória, sendo o oxigênio o acceptor final de elétrons, com produção de água. A fermentação é constituída de reações em que compostos orgânicos atuam como substratos e como agentes de oxidação, em uma sequência ordenada de reações enzimáticas. Tem em comum com a respiração a via glicolítica até a formação de piruvato, o qual, na fermentação, é descarboxilado a aldeído acético, com posterior redução a etanol (Figura 39).

Se o interesse for a multiplicação celular para produção de biomassa deve-se trabalhar em aerobiose, pois nessa situação a célula respira e a produção de energia é muito maior e, conseqüentemente, a produção de novas células.

Mediante respiração o metabolismo celular das leveduras produz poucos produtos. O açúcar e uma adequada fonte de nitrogênio promovem a formação de massa celular, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Por respiração são formados 43,20g de massa celular por 100g de glicose metabolizada. Já em anaerobiose, a fermentação do açúcar produz diversos produtos além de massa celular, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, dentre os quais etanol, glicerol, álcoois homólogos superiores, ácidos orgânicos, aldeídos, ésteres, etc. Por fermentação são formados apenas 1,70g de massa celular por 100g de glicose

metabolizada. Portanto, a partir da mesma quantidade de glicose, a fermentação gera apenas 4% da massa celular que poderia ser formada por respiração.

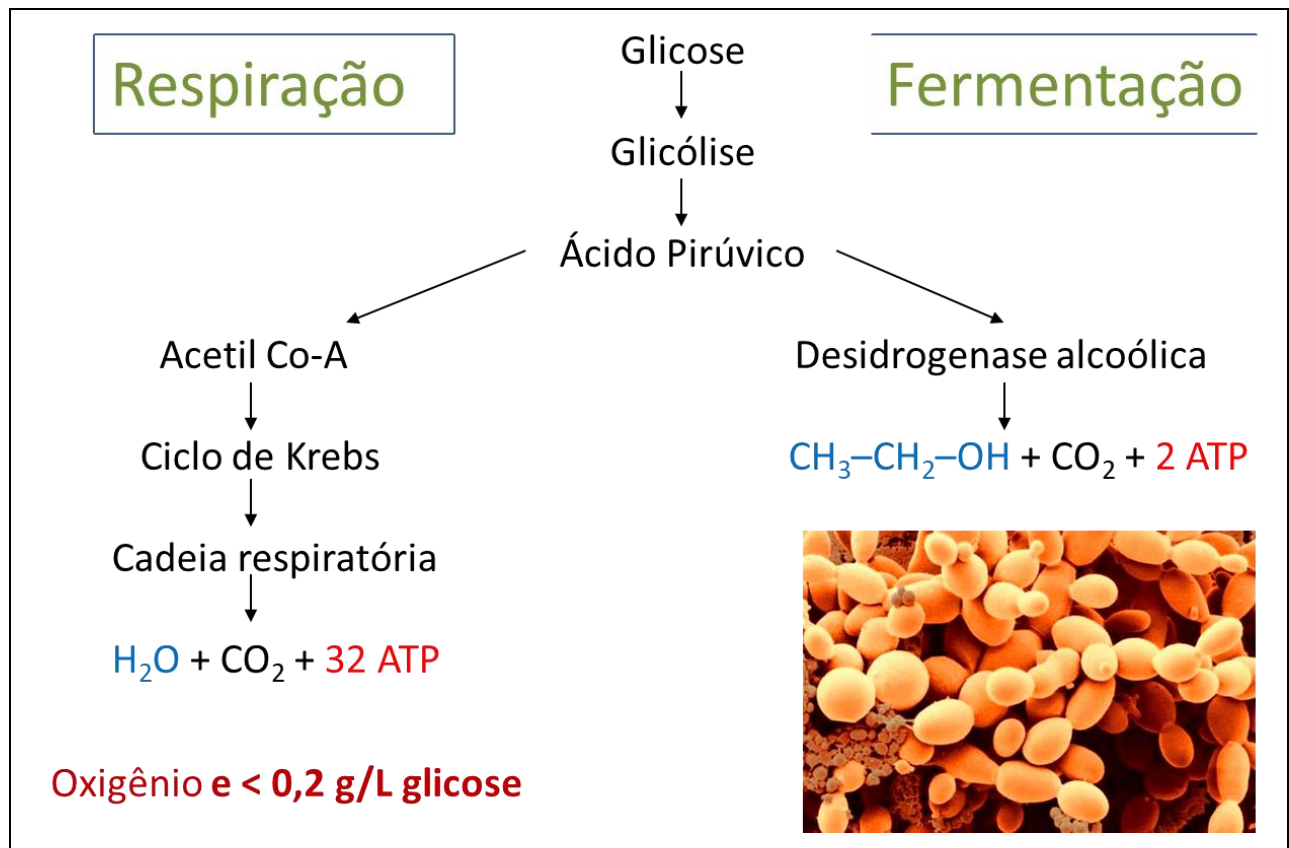


Figura 39. Sequência bioquímica básica dos processos catabólicos da levedura.

Portanto, as leveduras são organismos facultativos que possuem a habilidade de obter energia para a manutenção das suas funções vitais a partir de compostos orgânicos adequados tanto sob condições aeróbicas quanto anaeróbicas. Nas células de leveduras, sob condições aeróbicas, os açúcares são metabolizados a  $CO_2$  e água, com liberação máxima de energia. Se não houver oxigênio disponível, a liberação de energia por molécula de açúcar é pequena porque, sob esta condição, ocorre a fermentação do açúcar com produção de etanol e  $CO_2$ . Porém, para que a levedura realize respiração, além da presença de oxigênio, há a necessidade de uma baixa concentração de açúcar no meio (menor que 0,2 g/L). Sob estas condições ocorre o chamado Efeito Pasteur, com alta produção de biomassa porque a energia liberada pelo processo de respiração é alta. Quando a concentração de açúcar dissolvido no meio é elevada, mesmo na presença de oxigênio, ocorre fermentação, caracterizando o chamado Efeito Crabtree (Figura 40).

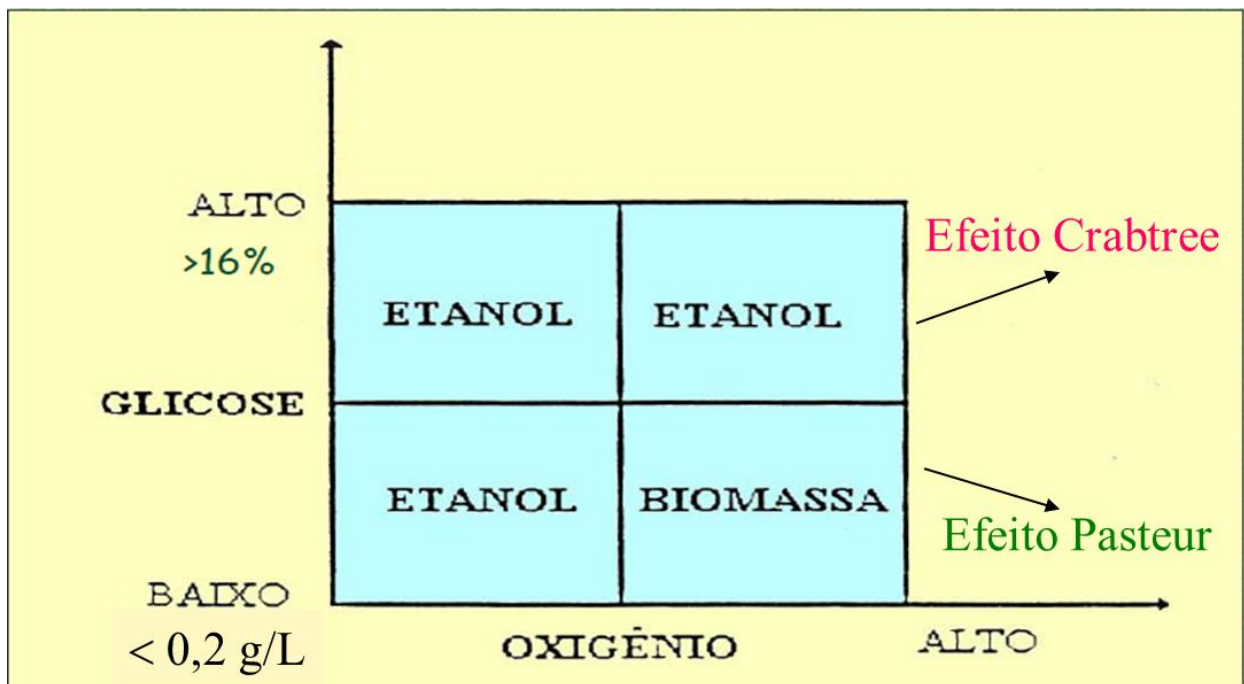


Figura 40. Efeito da presença de oxigênio e da concentração de glicose de açúcares do substrato sobre o metabolismo de leveduras *Sacharomyces cerevisiae*.

O Efeito Crabtree ocorre porque a alta concentração de glicose dissolvida no meio causa inibição e repressão dos citocromos da cadeia respiratória, reduzindo, portanto, a respiração e estimulando a fermentação, mesmo em alta concentração de oxigênio no meio. Ocorre, portanto, a fermentação anaeróbica, com produção de etanol, ainda que sob condições aeróbicas.

Embora as condições de anaerobiose e/ou alta concentração de glicose no meio sejam fundamentais para a produção de etanol, existem outras condições essenciais que devem ser atendidas, principalmente quanto às necessidades das leveduras para os nutrientes essenciais e para os fatores físico-químicos do meio. Por exemplo, os elementos C, H, O, N, P, K, S, Ca e Mg em maiores concentrações e os elementos Mn, Fe e Zn em menores concentrações são fundamentais porque desempenham papel importante no metabolismo celular (Figura 41). É importante lembrar que  $C_6H_{10}O_3N$  compõe a maior parte (92%) da matéria seca das leveduras. Todos os minerais juntos somam os restantes 8% da matéria seca.

O nitrogênio é essencial ao crescimento e à fisiologia das leveduras, uma vez que a síntese de proteínas, enzimas e ácidos nucleicos dependem da existência de uma fonte nitrogenada. As leveduras assimilam ainda aminoácidos e peptídeos. O metabolismo das leveduras requer ainda a presença de outros sais minerais para seu adequado desempenho. Um dos elementos mais importantes é o fósforo, o qual está relacionado como o mecanismo de acúmulo, transferência e liberação de energia, através das ligações fosfóricas de alto nível energético.

# A FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

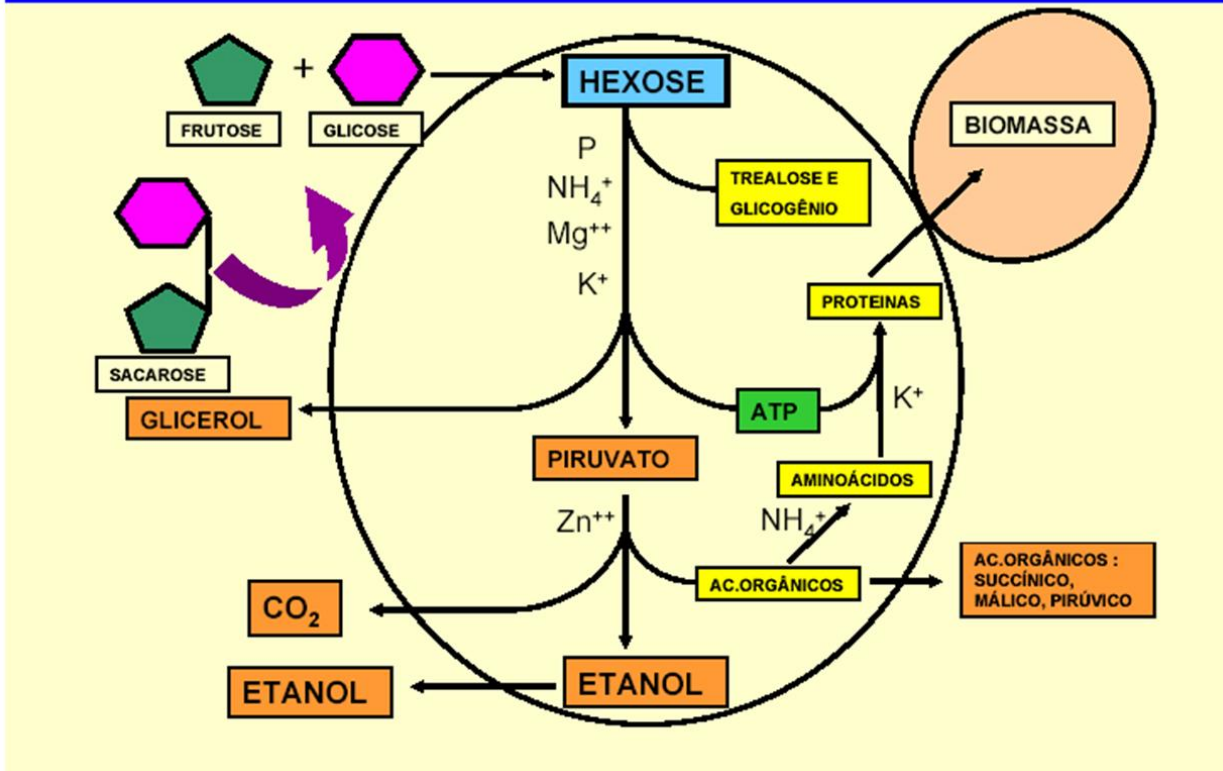


Figura 41. Participação dos minerais no metabolismo fermentativo de leveduras.

Outros elementos importantes são enxofre, ferro, magnésio, cálcio, potássio, manganês, zinco e cobre, os quais participam como constituintes de proteínas e enzimas ou como catalisadores de reações durante a fermentação. Deve-se salientar ainda que as vitaminas, principalmente as do grupo B, podem acelerar o curso das fermentações, embora as leveduras sejam capazes de produzir as vitaminas de que necessitam.

## 16.3. BACTÉRIAS CONTAMINANTES

Em condições adequadas de anaerobiose, temperatura, pH e concentração de açúcares, resultam da fermentação alcoólica o álcool etílico e o gás carbônico como produtos principais. Porém, se não forem observados cuidados mínimos quanto à qualidade da matéria prima, pureza do fermento, controle de pH e da temperatura, limpeza dos equipamentos, entre outros, pode ocorrer o desenvolvimento de microrganismos contaminantes do processo, principalmente bactérias (Figura 42), que produzem fermentações indesejáveis, das quais resultam componentes secundários à fermentação alcoólica. Estas fermentações concorrem para a diminuição do rendimento alcoólico, pois açúcares são consumidos e outros produtos, que não o etanol, são

produzidos. Além disso, as bactérias produzem toxinas nocivas ao fermento, ocasionando queda da viabilidade celular do fermento.

Dentre estas fermentações indesejáveis, destaca-se a láctica, cujas bactérias são introduzidas no processo juntamente com a matéria prima e que são microrganismos termodúricos e resistentes à acidez, constituindo o grupo de maior frequência na fermentação alcoólica.

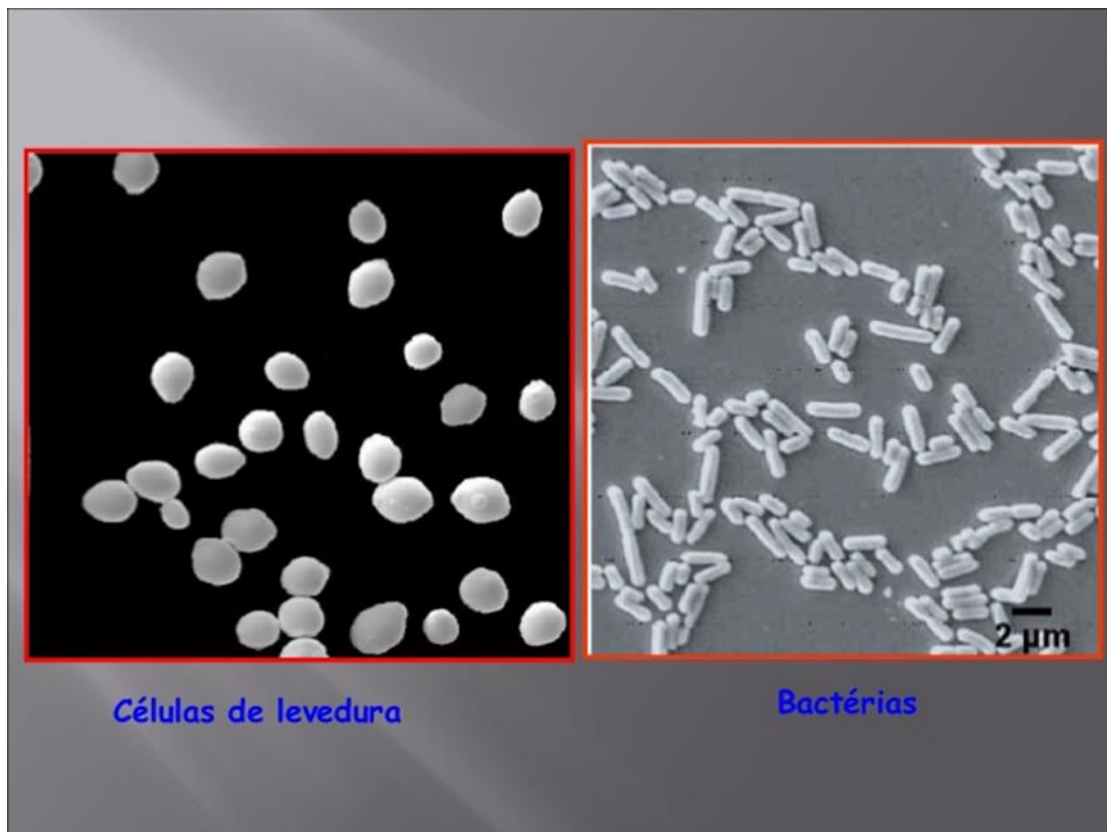


Figura 42. Morfologia típica de células de leveduras (ovaladas) e de bactérias (bastonetes).

## **17. TRATAMENTO DO CALDO E PREPARO DO MOSTO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL**

A qualidade do caldo deve ser tal que não comprometa a condução normal de um processo fermentativo e nem cause problemas na centrifugação do vinho ou na destilação. Além da qualidade intrínseca da matéria-prima, o tratamento do caldo para a produção de etanol visa:

- eliminação de impurezas grosseiras (bagacilho, terra, cinzas, etc), as quais desgastam os equipamentos, causam incrustações, diminuem a capacidade de produção e dificultam a recuperação do fermento
- máxima eliminação possível de partículas coloidais, as quais dificultam a recuperação do fermento e são responsáveis pela formação de espuma
- preservação dos nutrientes: vitaminas, açúcares, fosfatos, sais minerais, aminoácidos livres, necessários ao metabolismo das leveduras
- minimização da contaminação microbiana, pois os microrganismos competem com a levedura por substrato e podem produzir metabólitos tóxicos às leveduras, diminuindo a eficiência e a produtividade da fermentação, formar gomas que dificultam a centrifugação e ainda causar floculação no fermento e formação de espuma.

O tratamento de caldo para produção de etanol envolve peneiragem, caleagem, aquecimento, decantação, filtração, concentração e resfriamento (Figuras 43 e 44). Comparando esse tratamento com o tratamento de caldo para produção de açúcar branco observa-se que no tratamento para produção de etanol não há a etapa de sulfitação do caldo, pois a coloração do caldo não interfere na fermentação e o anidrido sulfuroso é um agente antisséptico, que prejudicaria o desenvolvimento das leveduras e, conseqüentemente, o processo fermentativo de transformação dos açúcares em etanol.

As considerações expostas no capítulo referente ao tratamento do caldo para a produção de açúcar são válidas neste capítulo, guardadas as ressalvas que serão apontadas em cada uma das etapas abaixo descritas.

Considera-se que a lavagem da cana é responsável pela remoção de grande parte das impurezas grosseiras, sendo que sua eficiência dependente não somente do volume de água aplicado, mas também da forma e qualidade da aplicação, do tipo de mesa instalada e das condições de solo e clima no momento do carregamento da cana no campo, as quais influenciam a quantidade de impurezas grosseiras carregadas para a usina juntamente com a cana.

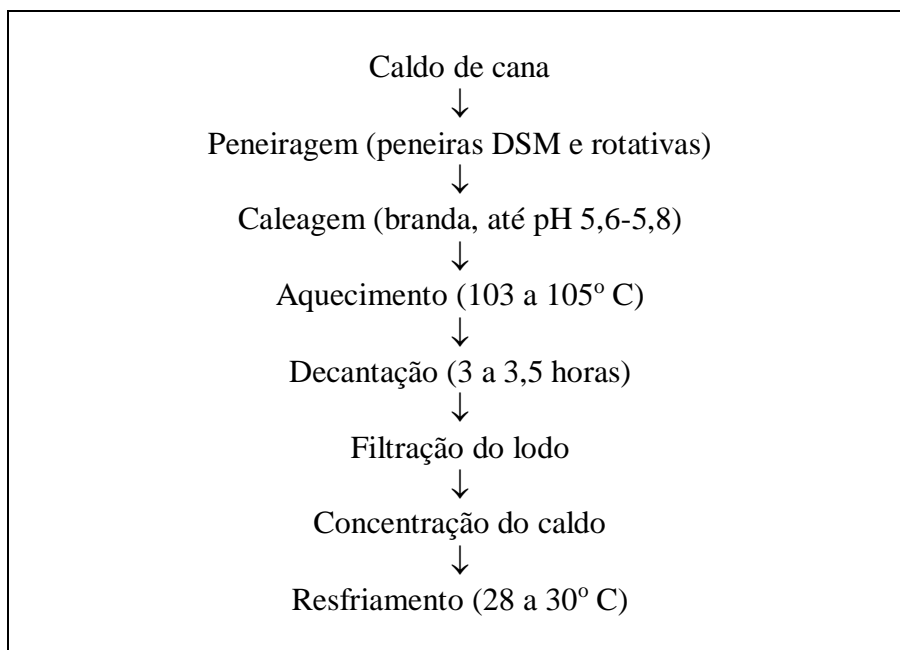


Figura 43. Tratamento recomendado para destilaria autônoma.

A peneiragem visa a remoção das partículas leves, principalmente bagacilho, pelas peneiras tipo DSM e das partículas mais pesadas, como areia e terra, pelas peneiras rotativas. As consequências desta etapa são a redução de entupimentos e de desgastes em equipamentos, em válvulas, bombas e tubulações.

No processo de caleagem, o tratamento de caldo com leite de cal não somente provoca a floculação das impurezas coloidais e sua consequente decantação, mas também protege os equipamentos contra a corrosão advinda da acidez do caldo.

O pH ideal a ser alcançado no processo de caleagem está na faixa de 5,6 a 5,8 no caldo decantado, pois não provoca remoção significativa de nutrientes, diminui a agressividade corrosiva do caldo, favorece a eliminação de microrganismos e provoca suficiente floculação dos coloides. A caleagem, portanto, deve ser branda e conduzida continuamente pela mistura do leite de cal com o caldo no tanque de caleagem, sendo a dosagem automaticamente controlada pelo monitoramento do pH do caldo caleado.

O caldo caleado deve sofrer um tratamento térmico (105°C) visando a eliminação dos microrganismos contaminantes e a sua desproteinização, de maneira a reduzir a formação de espumas durante o processo fermentativo.

Visando reduzir a perda de açúcares no lodo decantado, o filtro rotativo realiza a recuperação de caldos claros e turvos, os quais retornam ao processo. Devido a menor intensidade do tratamento do caldo, principalmente com relação à inexistência da sulfitação e à caleagem mais branda, a massa de torta de filtro resultante da filtração é praticamente metade da



obtida na fabricação de açúcar, embora possa apresentar uma maior concentração em açúcar residual.

A concentração do caldo em evaporadores de múltiplos-efeitos visa a produção de xarope para servir de matéria-prima tanto para elevação da porcentagem de ART do caldo, com conseqüente aumento do teor alcoólico do vinho, quanto para a continuidade do processo fermentativo em possíveis paradas no setor de extração do caldo. A concentração ideal do xarope para ser armazenado é de 60° Brix, embora usualmente se produza com 50-55° Brix.

O caldo sai do decantador com uma temperatura de aproximadamente 95°C, a qual deve ser abaixada para 28 a 30°C porque a temperatura do mosto que alimenta a dorna é um fator importante no rendimento da fermentação. Temperaturas do mosto de alimentação mais altas ocasionam menor eficiência e produtividade de fermentação por causar uma redução na viabilidade celular das leveduras e por proporcionar aumento da população de microrganismos contaminantes.

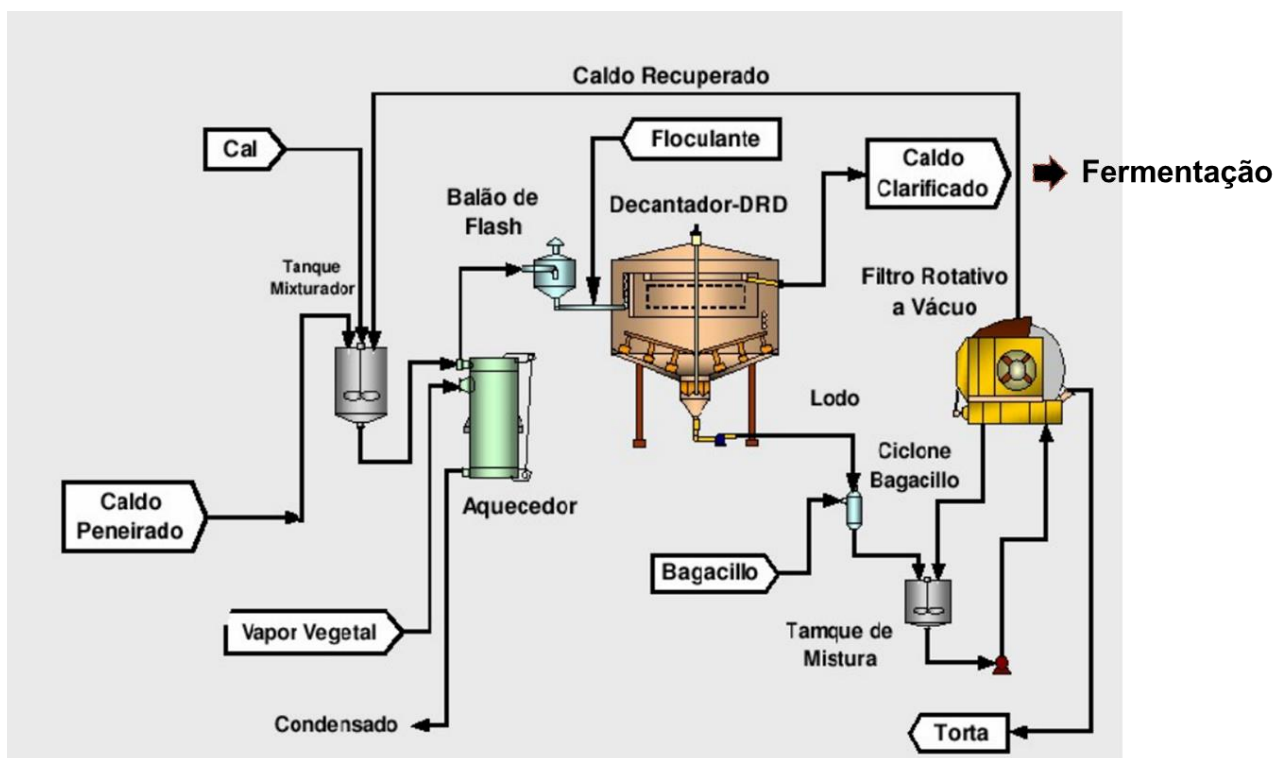


Figura 44. Esquema do tratamento do caldo para produção de etanol em destilarias anexas.

Mosto é o termo empregado em tecnologia para definir um líquido açucarado passível de ser fermentado. O preparo do mosto a partir de melaço ou xarope é simples, constituindo-se apenas numa diluição que corrige a concentração dos sólidos solúveis e, conseqüentemente, do ART. O caldo de cana não deve ser diluído porque normalmente o caldo não apresenta valores altos de ART devido à própria concentração de sólidos solúveis da cana e à realização da

embebição do bagaço durante a extração. A concentração do caldo até 20-21° Brix em pré-evaporadores ou até 50-60° Brix em evaporadores eleva o teor de ART do mosto e, conseqüentemente, o grau alcoólico do vinho resultante da fermentação do mosto. Normalmente, um mosto com 18° Brix origina um vinho com 9 a 10% de etanol.

## 18. PREPARO DO FERMENTO

O mosto preparado deve ser inoculado com as leveduras, que são os microrganismos responsáveis pela fermentação alcoólica. Para que as fermentações sejam conduzidas satisfatoriamente, é necessário que se adicione ao mosto uma quantidade compatível de microrganismos capaz de desdobrar em tempo hábil os açúcares do mosto em etanol e gás carbônico. Esta suspensão de células de levedura é chamada de fermento, pé-de-cuba ou “starter”, que nada mais é que o inóculo inicial. Normalmente a proporção do pé-de-cuba em relação ao mosto em processo de fermentação industrial é de 30% em massa úmida.

O fermento prensado compõe-se de um agrupamento de células da espécie *Saccharomyces cerevisiae* que, embora seja utilizado para panificação, é também um fermento alcoólico. A proporção normal é a inoculação de 20 kg de fermento prensado em 1 m<sup>3</sup> de mosto (Figura 45).

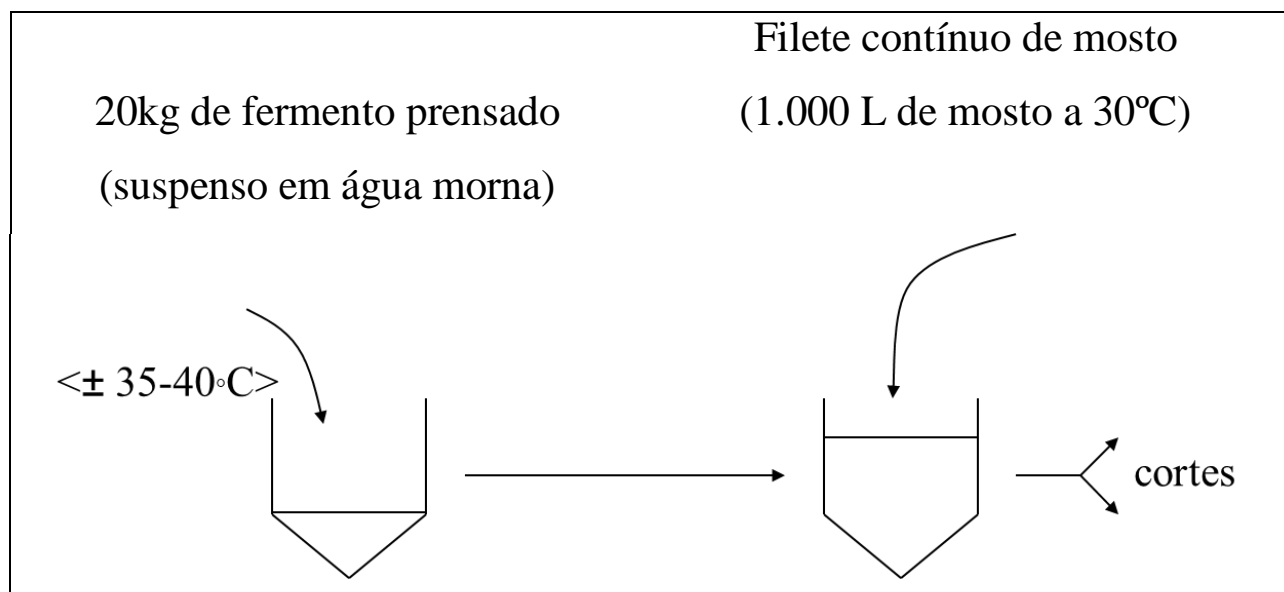


Figura 45. Preparo do fermento prensado.

Os fermentos selecionados são fermentos originados pela seleção laboratorial de leveduras selvagens, com características fermentativas favoráveis, tais como:

- resistência a altas temperaturas e à acidez
- resistência à pressão osmótica e a altos teores alcoólicos
- maior rendimento e produtividade de fermentação
- resistência à contaminação bacteriana
- estabilidade genética

O fermento selecionado requer um cuidado maior no seu preparo, englobando etapas laboratoriais e industriais (Figura 46), no sentido de evitar contaminações, já que tratam-se de cepas puras selecionadas para a fermentação alcoólica.

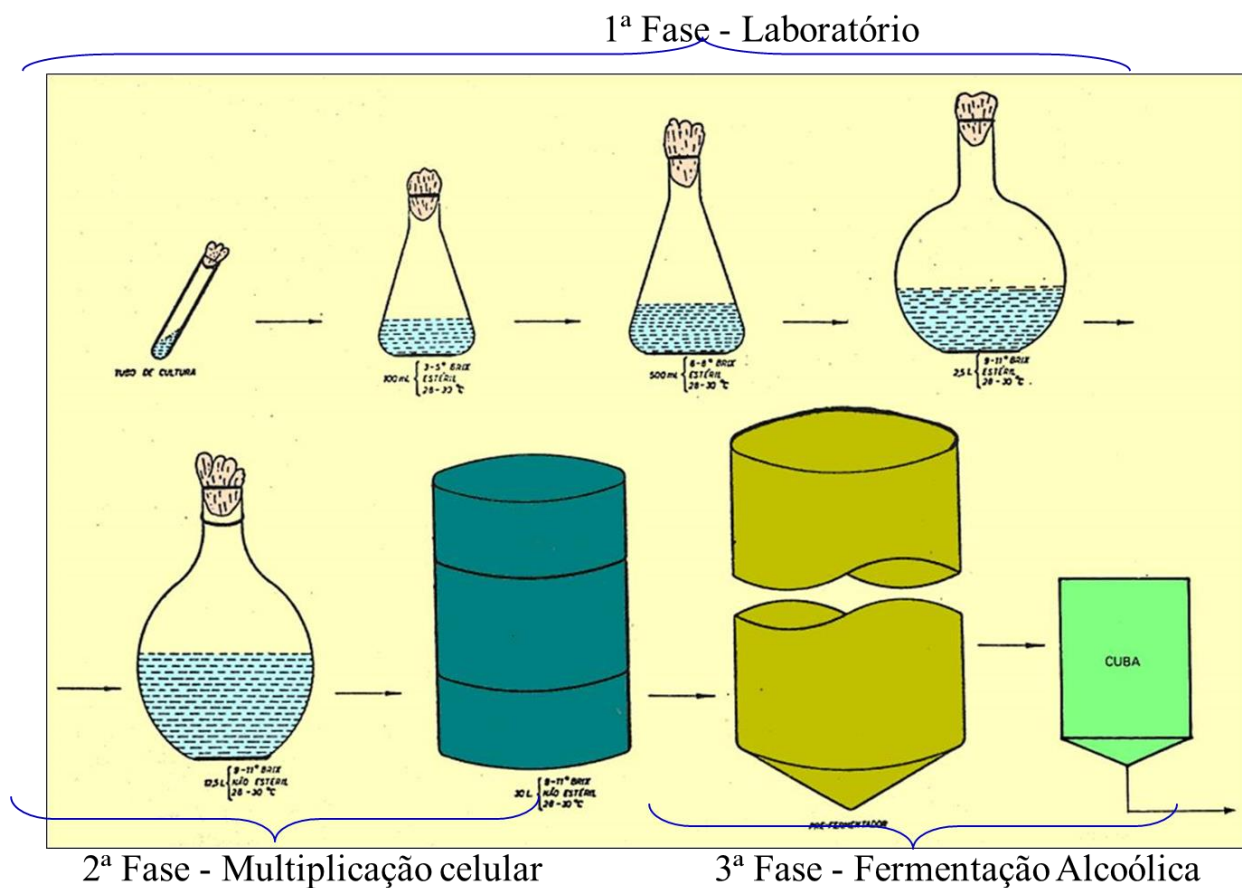


Figura 46. Preparo do fermento selecionado.

## 19. FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

Uma vez preparados o fermento e o mosto, ambos serão misturados nas dornas de fermentação, ocasião em que as leveduras irão, de modo gradativo, converter os açúcares em gás carbônico e etanol, sendo este último o objetivo do processo industrial. Diversos compostos secundários também são produzidos como co-produtos do metabolismo celular das leveduras (Figura 47).

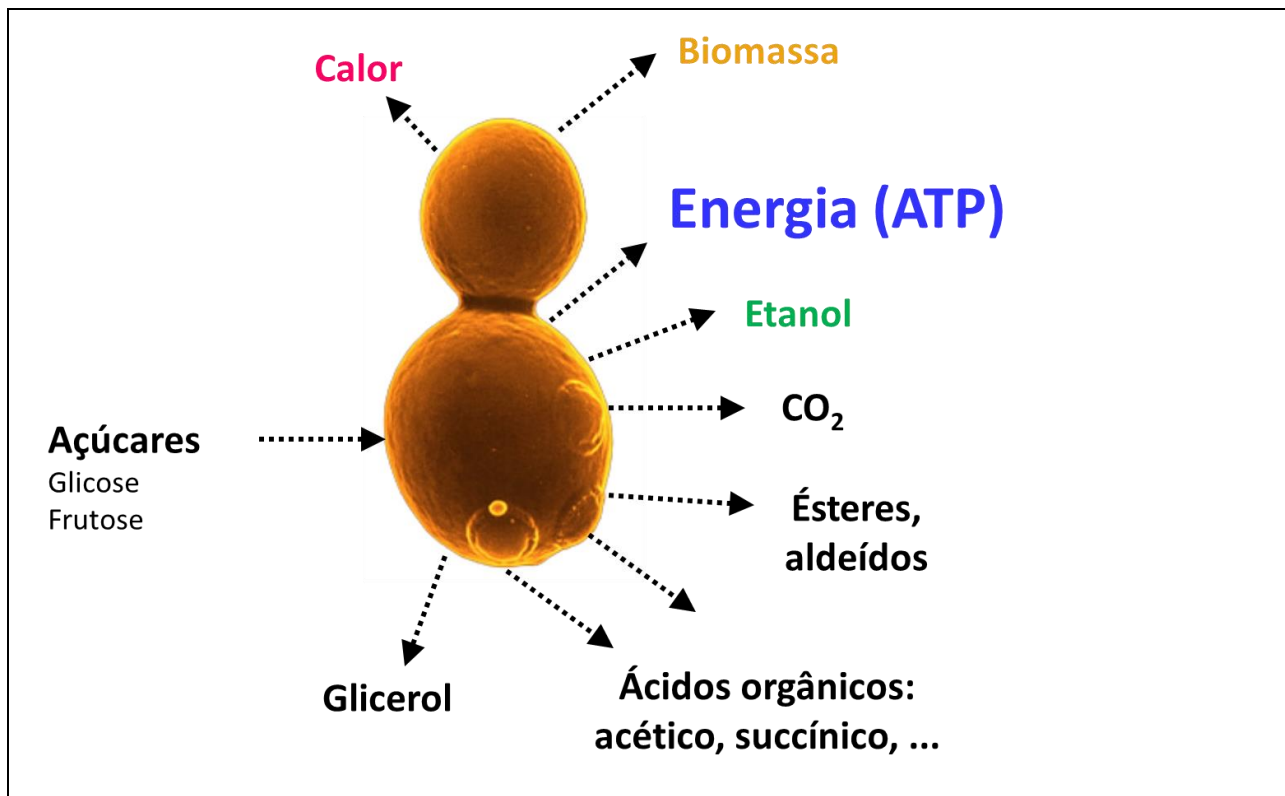


Figura 47. Formação de produtos pela fermentação alcoólica.

A fermentação alcoólica pode ser dividida em três fases distintas, embora não haja rigidez entre seus limites: fermentação preliminar ou pré-fermentação, fermentação principal ou tumultuosa e fermentação complementar ou pós-fermentação.

A fermentação preliminar somente ocorre em início de safra, quando o inóculo é pequeno. Esta fase inicia-se quando o mosto é adicionado ao levedo e caracteriza-se pela multiplicação das leveduras, com conseqüente consumo de açúcares e a uma lenta produção de etanol. A elevação da temperatura do mosto e o desprendimento de CO<sub>2</sub> são pequenos. Assim sendo, convém reduzir esta fase ao mínimo possível, já que o processo industrial de produção de etanol requer alta produtividade. Isso é conseguido utilizando em início de safra uma maior massa celular e leveduras de rápida multiplicação.

Com o aumento da produção de etanol, evidenciado pelo maior desprendimento de gás carbônico, tem-se o final da fase de fermentação preliminar, iniciando-se a fase de fermentação principal. Suas principais características são: intensa produção de etanol e desprendimento de CO<sub>2</sub>, elevação da temperatura do mosto, a qual deve ser controlada por resfriamento, progressivo aumento de formação de espumas e elevação da acidez do mosto. O final desta fase é observado quando diminui o desprendimento de CO<sub>2</sub> e, conseqüentemente, a turbulência característica do mosto em fermentação. A densidade do mosto diminui e o teor de sólidos solúveis tende a zero quando o mosto é preparado a partir de caldo de cana e a 3,5-5° Brix se o mosto é preparado a partir de melão. Esta diferença se deve ao melão apresentar maior teor de açúcares infermentescíveis.

Na fase de fermentação complementar verifica-se a diminuição da temperatura do vinho, elevação da acidez e a diminuição da viabilidade das células de levedura pela ação dos efeitos tóxicos do acúmulo de metabólitos, do esgotamento dos carboidratos e das toxinas excretadas ao meio pelos microrganismos contaminantes. Esta fase deve ser evitada na indústria porque, além destes efeitos indesejáveis, representa dispêndio de tempo, com capacidade de dorna ociosa e conseqüente diminuição da produtividade do processo de fermentação. Portanto, o vinho deve ser encaminhando à destilação logo que se encerre a fase principal da fermentação.

### 19.1. PROCESSOS INDUSTRIAIS DE CONDUÇÃO DA FERMENTAÇÃO

Na indústria, as fermentações diferenciam-se segundo o regime de alimentação das dornas: processos descontínuos (batelada) ou contínuos. Uma segunda classificação refere-se à reutilização para uma nova fermentação da massa de levedura produzida numa fermentação anterior: com reciclo ou sem reciclo de células.

O processo descontínuo sem reutilização do fermento é utilizado na fermentação de matéria-prima amilácea ou feculenta, as quais não permitem separação do fermento do vinho devido à presença de sólidos insolúveis no vinho advindos do próprio preparo da matéria-prima para fermentação.

O processo descontínuo com reciclo do fermento por decantação é utilizado na multiplicação do fermento em início de safra. Neste processo, após a fermentação o fermento decanta no vinho e as células de levedura são recuperadas mediante a drenagem do vinho sobrenadante. Este processo é utilizado industrialmente para a produção de aguardente.

### 19.1.1. Processo de fermentação em batelada

O processo de fermentação em batelada pode ser classificado em batelada simples e batelada alimentada, a depender da forma de abastecimento da dorna. Na batelada simples, o fermentador é preenchido com mosto e leveduras ao mesmo tempo. Este processo é indicado quando há pequenas quantidades de mosto. Já na batelada alimentada, o tanque de fermentação é primeiramente preenchido com o pé de cuba e, em seguida, o mosto é introduzido sobre ele, fazendo com que a fermentação se inicie enquanto a dorna está sendo abastecida.

O processo industrial de fermentação em batelada alimentada para produção de etanol no Brasil se denomina Melle-Boinot (Figura 48). Neste processo, assim que se esgotam os açúcares do mosto em fermentação, o vinho bruto (líquido + fermento) é bombeado da dorna para as centrífugas separadoras de fermento, onde ocorre a separação do vinho delevurado e do leite de levedura. O vinho delevurado é encaminhado à dorna volante para posteriormente ser destilado. O leite de levedura é encaminhado à cuba de tratamento ácido do fermento, para ser reutilizado em nova batelada.

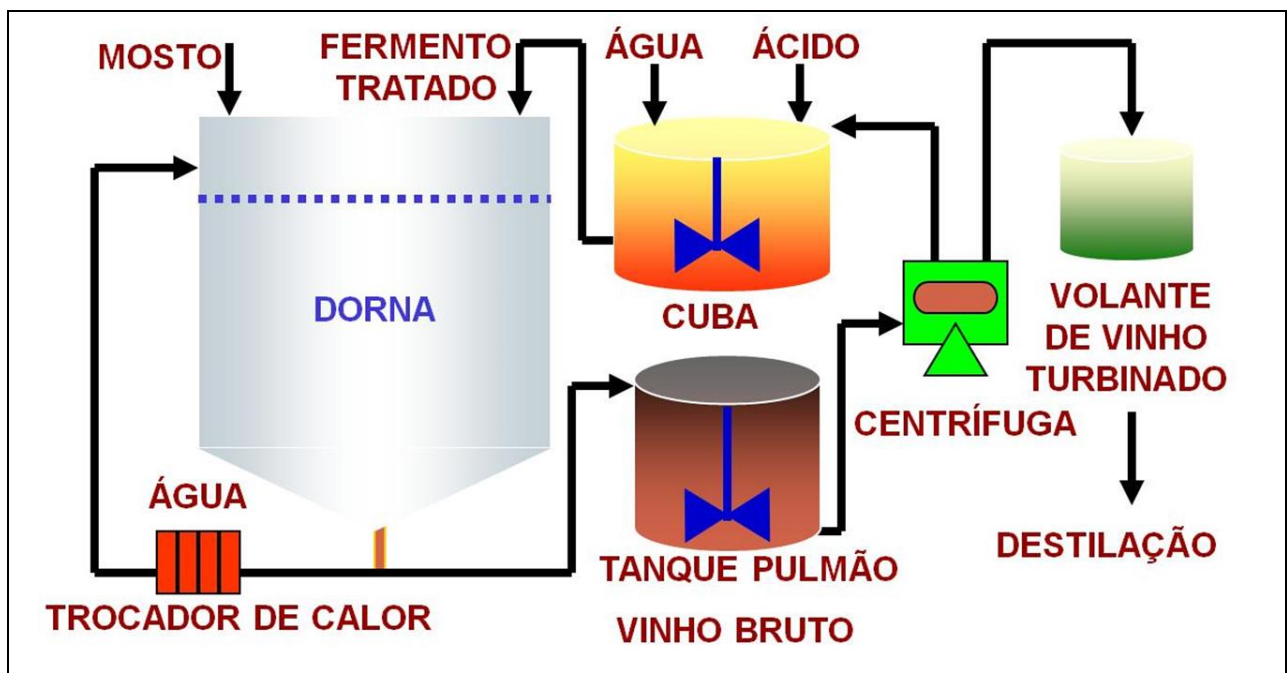


Figura 48. Processo industrial de fermentação alcoólica em batelada alimentada com reciclo de fermento por centrifugação.

O tratamento ácido do fermento (Figura 49) visa a redução da carga bacteriana contaminante da fermentação, mediante o abaixamento do pH do leite de levedura para 2,5, condição mantida por 2h sob agitação. Grande parte das espécies de bactérias contaminantes não suportam esta condição de acidez e morrem. Algumas espécies de bactérias lácticas suportam a

condição, porém entram em estado de latência, sem apresentar atividade metabólica. A adição inicial de água e o efeito do ácido promovem uma lavagem da parede celular das leveduras, facilitando a passagem de substrato e produtos através dela. Ainda, o tratamento ácido propicia a eliminação das células mais velhas de levedura, as quais possuem menor capacidade de transformação de açúcar em etanol.

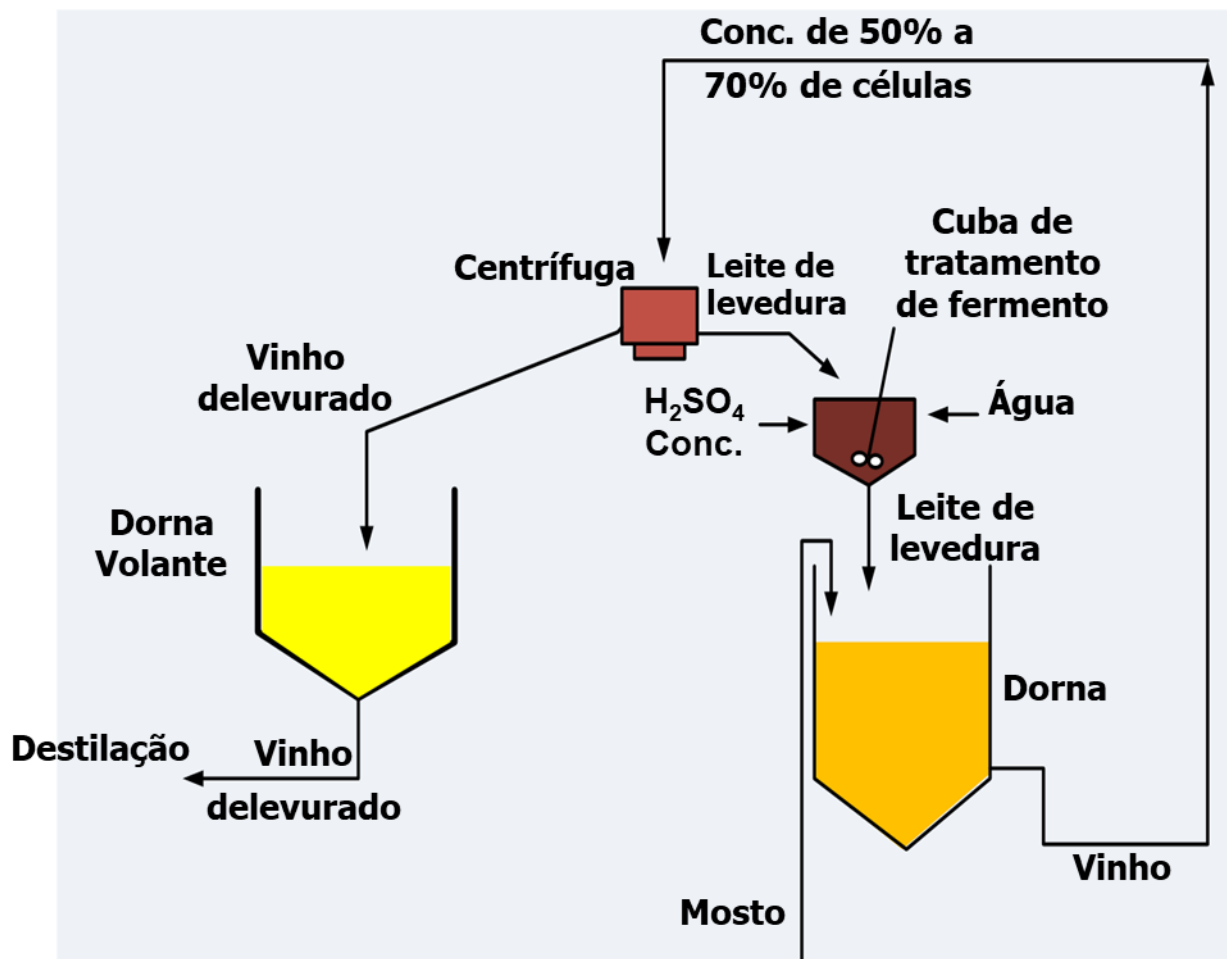


Figura 49. Tratamento ácido do fermento para recirculação do pé-de-cuba.

A mistura do pé-de-cuba tratado (pH 2,5) com o mosto preparado (pH 5,7) apresenta um pH médio de 4,7, ideal para o metabolismo fermentativo das leveduras. As fermentações em batelada alimentada se processam em 5 a 6 horas, com teores alcoólicos do vinho variando de 8 a 9% em volume.

#### 19.1.2. Processo de fermentação contínua

Esses processos requerem instalações de menor capacidade nominal em relação à descontínua para uma mesma produção horária, reduzindo os custos de investimento e os tempos





A fermentação contínua industrial é realizada em múltiplos estágios, com arranjo dos fermentadores em série. O número de dornas ligadas em série pode variar de quatro a seis, sendo mais comuns os projetos com quatro dornas interligadas. A fermentação do mosto de inicia nas primeiras dornas e se completa nas últimas, onde se obtém um vinho com alta concentração em etanol. A alimentação da primeira dorna é realizada por cima e o mosto em fermentação é retirado pelo fundo e é bombeado para a parte intermediária da próxima dorna. E assim sucessivamente. O volume de dornas é distribuído cerca de 70% nas duas primeiras dornas, onde basicamente ocorre a fermentação, e o restante em 2 a 4 dornas finais, que completam a fermentação do mosto. O fundo da dorna deve ser cônico, com inclinação de 60% e com calhas de passagem de espuma de uma dorna para outra. Devido à primeira dorna trabalhar com uma menor concentração de etanol, a inibição do etanol sobre as células de levedura é reduzida e a produtividade neste fermentador é elevada. Nos demais fermentadores, as leveduras vão sofrer progressivamente uma maior inibição pelo etanol produzido, porém nestes fermentadores as leveduras precisam, também progressivamente, converter menos açúcar em etanol.

## 20. DESTILAÇÃO

A destilação consiste em aquecer um líquido levando-o à ebulição, seguida da condensação dos vapores gerados visando transformá-lo em outro líquido, de concentração diferente de líquido original (Figura 51). Como as substâncias voláteis possuem diferentes graus de volatilidade, é possível a sua separação através da diferença do ponto de ebulição de cada substância mediante destilação.

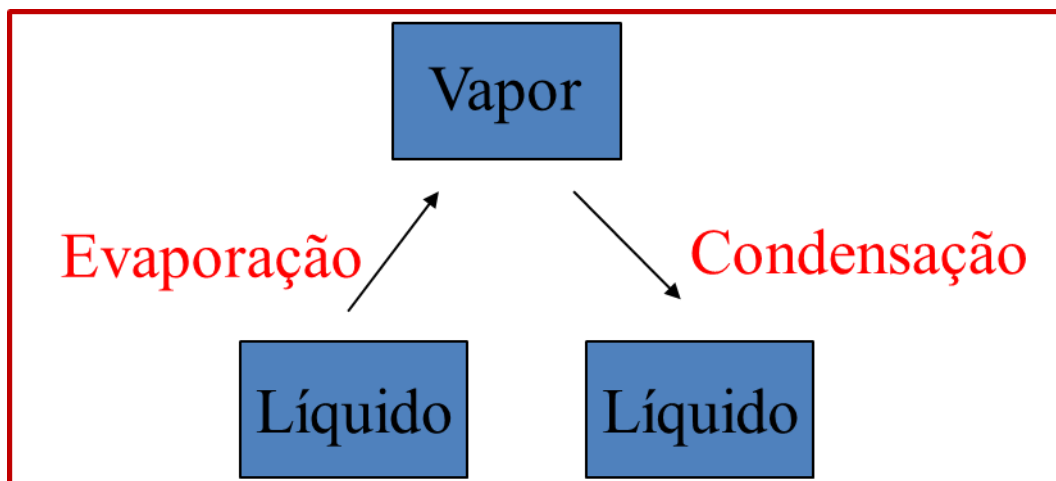


Figura 51. Operação de destilação.

Supondo uma mistura água e etanol, o ponto de ebulição desta mistura será intermediário ao ponto de ebulição de cada um dos componentes isoladamente, sendo mais próximo do ponto de ebulição do comportamento que estiver em maior concentração (Tabela 5 e Figura 52).

Tabela 5. Ponto de ebulição de diferentes misturas hidralcoólicas e composição do vapor inicial proveniente da destilação destas misturas.

MISTURA HIDRALCOÓLICA		COMPOSIÇÃO DO VAPOR INICIAL	
% etanol (v/v)	Ponto de ebulição (°C)	% etanol (v/v)	% água (v/v)
0	100,0	0	100
5	95,9	36	64
10	92,6	51	49
20	88,3	62	38
30	85,7	69	31
60	82,3	85	15
<b>97,6*</b>	<b>78,15</b>	<b>97,6*</b>	2,4
100	78,35	100	0

\* Mistura azeotrópica: ponto de ebulição da mistura água e etanol é menor que o do etanol puro, assim os vapores provenientes da destilação desta mistura possuem a mesma composição que a mistura.

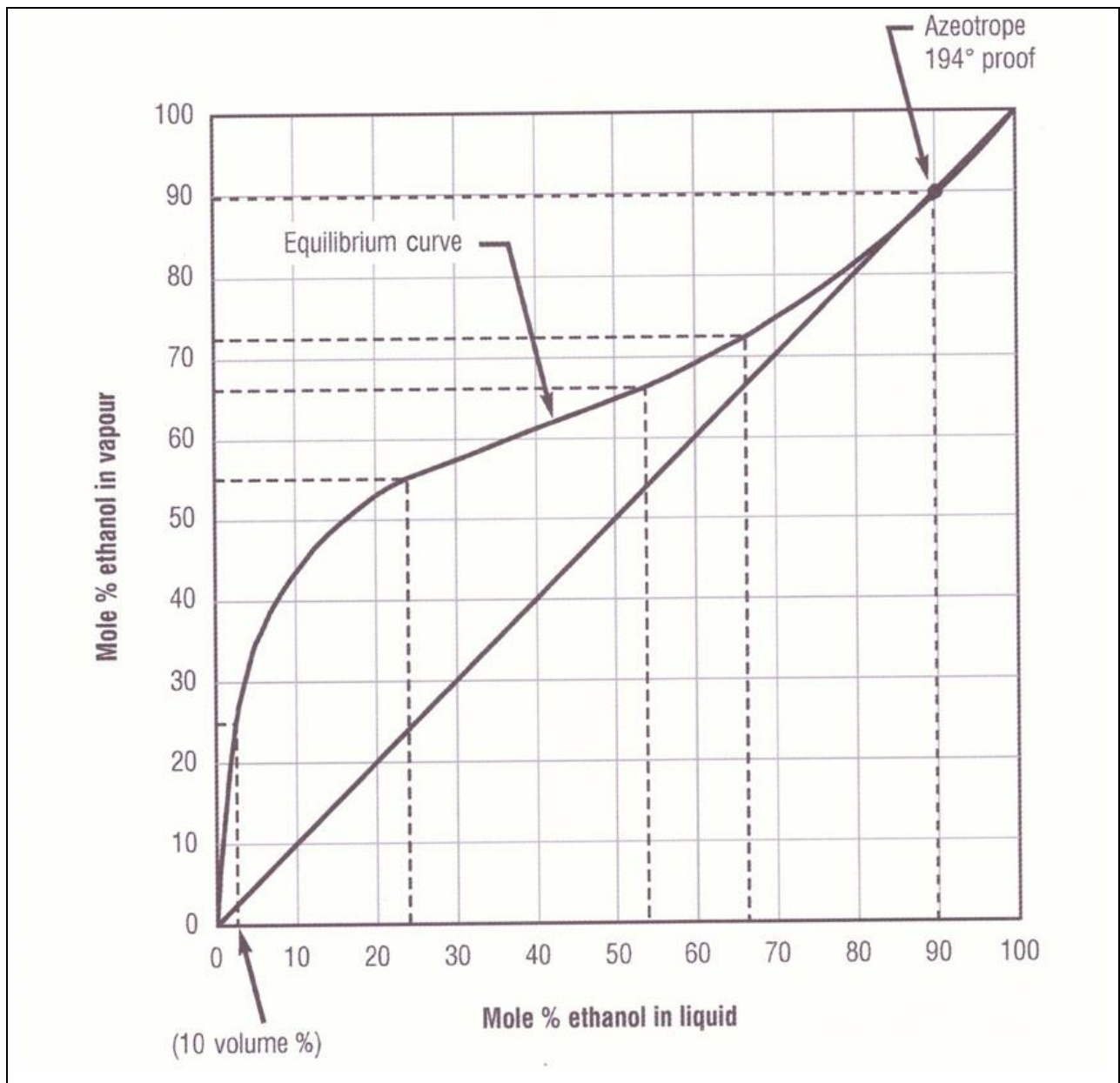


Figura 52. Equilíbrio líquido-vapor em destilação de mistura hidralcoólica.

As misturas hidralcoólicas se fracionam por destilação, sendo que o etanol que é mais volátil que a água se desprende primeiro da mistura devido ao grau de volatilidade (menor ponto de ebulição). Na mistura original se concentra a água, componente menos volátil (Figura 53). Assim pode-se estabelecer:

$$\frac{\underline{P}}{\underline{Q}} < \frac{\underline{p}}{\underline{q}}$$

Onde:

P e p = concentração de etanol no líquido gerador e no vapor condensado, respectivamente.

Q e q = concentração de água no líquido gerador e no vapor condensado, respectivamente.

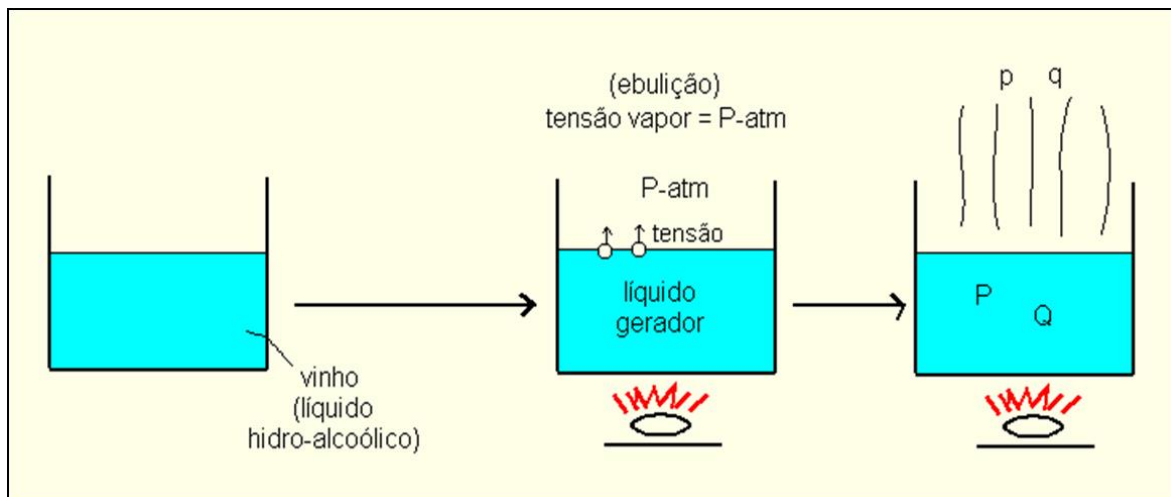


Figura 53. Separação dos componentes de uma mistura hidralcoólica mediante destilação.

O processo de destilação industrial é realizado em recipientes fechados, para que os vapores gerados possam ser condensados. O equipamento mais simples para realizar destilação alcoólica é o alambique (Figura 54). A caldeira trabalha com uma carga de vinho a dois terços do seu volume e normalmente é aquecida por vapor ou fogo. Os vapores iniciais são formados e encontram uma superfície mais fria na região do capitel, condensando-se e voltando ao líquido gerador, sofrendo, portanto, retrogradação. A retrogradação também acontece quando os vapores atingem a alonga, sendo que os vapores que passam pela alonga vão ser condensados quando trocarem calor com o líquido refrigerante do condensador. No início da destilação, o líquido que flui do aparelho após a condensação dos vapores possui graduação alcoólica elevada, porém à medida que o líquido gerador vai se esgotando em etanol, o destilado torna-se mais pobre. Alambiques são utilizados industrialmente no Brasil para a produção de aguardente de cana ou cachaça.

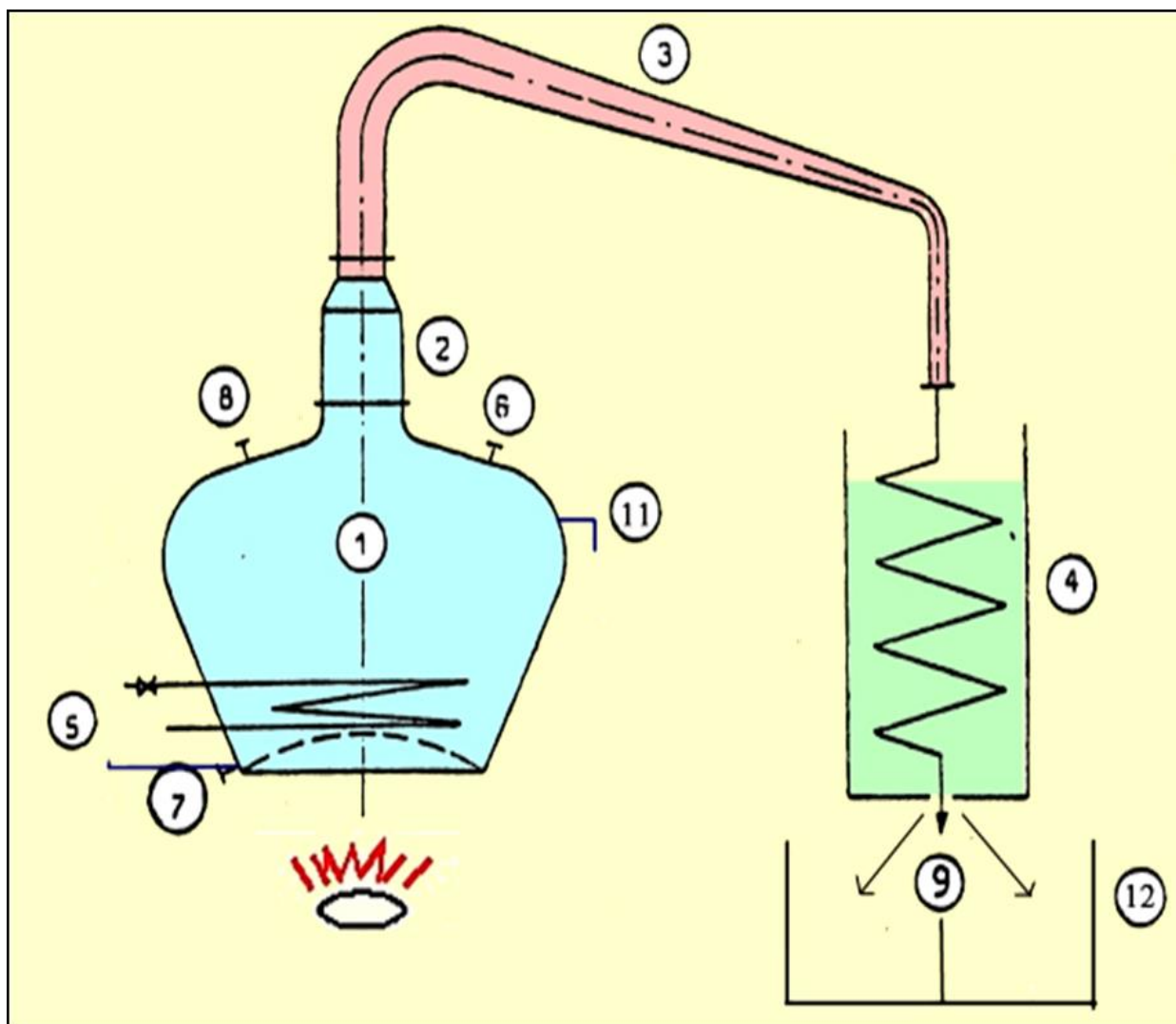


Figura 54. Esquema de um alambique simples. 1 = Cucurbita ou Caldeira; 2 = Capitel, Domo ou Elmo; 3 = Alonga; 4 = Condensador e Resfriador; 5. Elemento de aquecimento (vapor, elétrico, fogo direto); 6 = Entrada de vinho; 7 = Válvula de descarga de vinhaça; 8 = Válvula igualadora das pressões; 9 = Canalização de destilados; 11 = Válvula reguladora do nível de líquido na caldeira; 12 = Caixa receptora de destilado.

No entanto, o vinho proveniente da fermentação do mosto não é uma mistura hidralcoólica pura. O vinho possui uma composição complexa, com constituintes de natureza líquida, sólida e gasosa:

- líquida: água (90-91%), etanol (8-9%), ácidos orgânicos e ácido sulfúrico, ésteres, aldeídos, álcoois superiores (amílico, propílico, butílico, etc), glicerol
- sólida: células de levedura e bactéria, terra, areia, bagacilho, açúcares residuais e sais minerais dissolvidos
- gasosa: CO<sub>2</sub>

Os componentes do vinho podem ser classificados em voláteis e fixos:

- voláteis: água, etanol, álcoois superiores, ácido acético, aldeídos, ésteres....
- fixos: substâncias sólidas do vinho, ácido láctico, glicerol

Cada componente do vinho possui seu ponto de ebulição característico, o qual governa a destilação do componente em função da sua volatilidade (Tabela 6). Dessa foram, as substâncias sob destilação podem ser agrupadas em:

**Grupo 1:** substâncias mais voláteis que o etanol (aldeído acético, acetato de etila, metanol) = componentes de “cabeça”.

**Grupo 2:** substâncias menos voláteis que o etanol (furfural, ácido acético) = componentes de “cauda”.

Tabela 6. Ponto de ebulição, no estado puro, dos principais componentes voláteis do vinho oriundo da fermentação do mosto de caldo de cana-de-açúcar.

Composto	Ponto de ebulição (°C)
Aldeído acético	20
Metanol	65
Acetato de etila	77
Etanol	78
n-Propanol	97
Água	100
Isobutanol	108
5-HMF	115
Ácido acético	118
Álcool isoamílico	130
Furfural	162
Carbamato de etila	183

No entanto, a volatilidade (ponto de ebulição) não é o único fator de separação das substâncias do vinho durante a destilação. Outro fator importante é a solubilidade da substância no etanol e/ou na água. Assim, substâncias com um ponto de ebulição mais alto podem não se separar do etanol se a solubilidade desta substância no etanol for grande, isto é, se a substância tiver alta afinidade com o etanol. É o caso dos álcoois superiores, que são componentes da mesma classe do etanol (álcoois) e, portanto, tem grande afinidade com o etanol e tem característica hidrofóbica. Por isso os álcoois superiores são denominados de óleo fúsel.

Assim sendo, outro fator de separação de algumas substâncias do vinho durante a destilação é a solubilidade preferencial da substância no etanol a quente, o que proporciona a formação de um terceiro agrupamento de substâncias sob destilação:

**Grupo 3:** Álcoois superiores (grande afinidade com o etanol apesar do maior ponto de ebulição).

O teorema de Barbet explica o efeito de volatilidade e da solubilidade preferencial das substâncias durante o processo de destilação:

$$S' = K \cdot S$$

Onde:

$S'$  = concentração da substância no etanol do vapor hidralcoólico

$K$  = coeficiente

$S$  = concentração da substância no etanol do líquido gerador

Assim, temos:

- $K > 1 \Rightarrow$  produtos de cabeça [substâncias de baixo ponto de ebulição (menor que o do etanol), substâncias muito solúveis em etanol e/ou substâncias pouco solúveis em água]
- $K < 1 \Rightarrow$  produtos de cauda [substâncias de alto ponto de ebulição (maior que o do etanol), substâncias muito solúveis em água e/ou substâncias pouco solúveis em etanol]

A Tabela 7 mostra os valores do coeficiente  $K$  para alguns componentes de “cabeça” e de “cauda” em processo de destilação com diferentes concentrações de etanol no líquido gerador.



Tabela 7. Valores do coeficiente K para alguns componentes de “cabeça” (K>1) e de “cauda” (K<1) em processo de destilação com diferentes concentrações de etanol no líquido gerador.

% etanol	Aldeído acético	Acetato de etila	Ácido acético	Furfural
10	6	5,7	0,25	0,45
30	8	5,4	0,35	0,35
40	10	4,8	0,40	0,30
50	11	3,9	0,50	0,25
60	12	3,3	0,56	0,21
70	13	3,1	0,65	0,20
80	14	2,8	0,75	0,17
90		2,4	0,85	

No entanto, existem substâncias que possuem coeficiente K maior que 1 em destilações de líquidos com baixo grau alcoólico e K menor que 1 em destilações de líquidos com alto grau alcoólico. É o caso de alguns álcoois superiores, tais como o álcool isoamílico (Tabela 8), cujo ponto de ebulição é 130°C:

Tabela 8. Valores do coeficiente K do álcool isoamílico em processo de destilação com diferentes concentrações de etanol no líquido gerador.

% álcool (v/v) no líquido gerador	K'
1	3,30
10	2,54
20	1,81
25	1,50
30	1,30
40	1,05
50	0,80
60	0,62
70	0,44
80	0,36
90	0,26
95	0,22

E destilações de líquidos com até 40% de etanol (v/v) o álcool isoamílico tem comportamento de produto de “cabeça” ( $K > 1$ ), evaporando-se e passando para a fase de vapor. Já em destilações de líquidos geradores com mais de 50% de etanol (v/v) o álcool isoamílico tem comportamento de produto de “cauda” ( $K < 1$ ), acumulando-se no líquido gerador na forma líquida. Outros álcoois superiores, tais como o propanol e o butanol possuem comportamento semelhante ao álcool isoamílico, sendo classificados como óleo de fúsel. Essa característica dos álcoois superiores é que possibilita a separação do óleo fúsel na coluna de retificação (coluna B) para produção de etanol hidratado.

## 20.1. PROCESSOS DE DESTILAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL CARBURANTE

As destilações para produção de etanol carburante são realizadas industrialmente em colunas contínuas. Uma coluna de destilação contínua é constituída de uma série de caldeiras superpostas, denominadas pratos ou bandejas, e o conjunto de pratos forma o tronco de destilação. Pela parte superior da coluna há a admissão do líquido a ser destilado e pela sua base há o sistema de aquecimento (vapor) e a saída do resíduo da destilação. As bandejas comunicam-se entre si através de sifões, que possibilitam a descida do líquido sob destilação e que delimitam o nível de trabalho da bandeja superior e estão mergulhados no líquido da bandeja inferior, impedindo assim a passagem direta de vapores pelas bandejas através dos sifões (Figura 55). Os vapores formados nas bandejas sobem na coluna através das calotas, borbulhando no líquido acumulado na bandeja superior, o que proporciona o seu aquecimento e conseqüente vaporização, além do seu enriquecimento em etanol (Figura 56). Assim, na coluna de destilação há um gradiente crescente de teor alcoólico e decrescente de temperatura com relação à altura da bandeja na coluna.

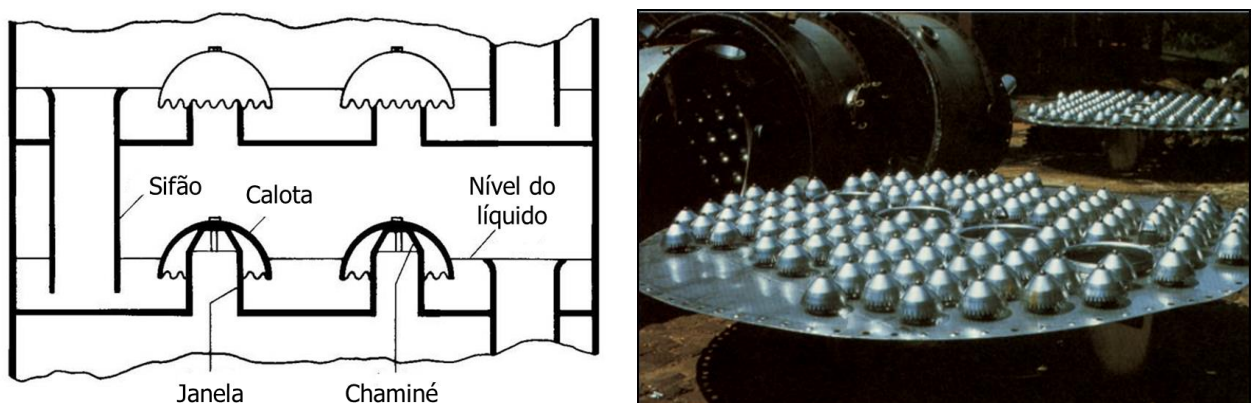


Figura 55. Bandejas calotadas de uma coluna de destilação.

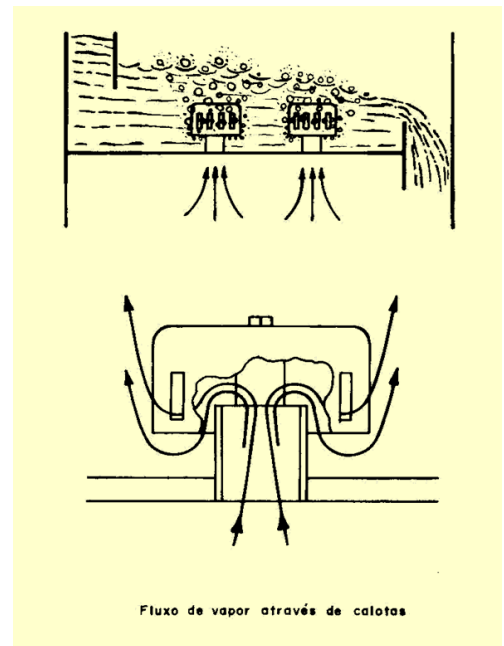
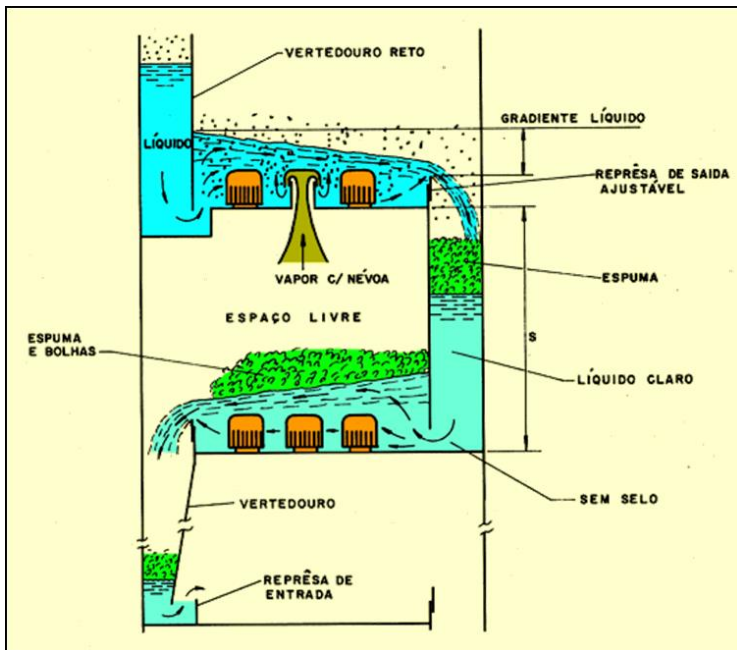


Figura 56. Fluxos de líquidos e vapores através das bandejas de uma coluna de destilação.

Além de bandejas calotadas, as colunas podem ser também construídas com bandejas perfuradas e valvuladas (Figura 57). As colunas com bandejas de calotas possuem excelente seletividade. As colunas com bandejas perfuradas são mais eficientes e possuem maior capacidade que as calotadas, porém são menos seletivas. As colunas valvuladas são as mais eficientes, possuem capacidade idêntica às perfuradas, são seletivas, porém são mais caras.



Figura 57. Elementos que permitem a passagem ascendente do vapor alcoólico através das diferentes bandejas em colunas de destilação: calotas (bandejas calotadas), válvulas (bandejas valvuladas) e perfurações (bandejas perfuradas).

A operação de destilação industrial tem por objetivo concentrar o etanol contido nos vinhos provenientes dos mostos fermentados, recebendo diferentes denominações específicas em função do líquido a ser destilado e da finalidade. A **destilação** do vinho (coluna A) origina um destilado mais concentrado em etanol, denominado flegma, o qual necessita ser concentrado e purificado em nova destilação, a **retificação** (coluna B), para se obter o etanol hidratado, o qual necessita passar por **desidratação** (coluna C) para se transformar em etanol anidro (Figura 58).

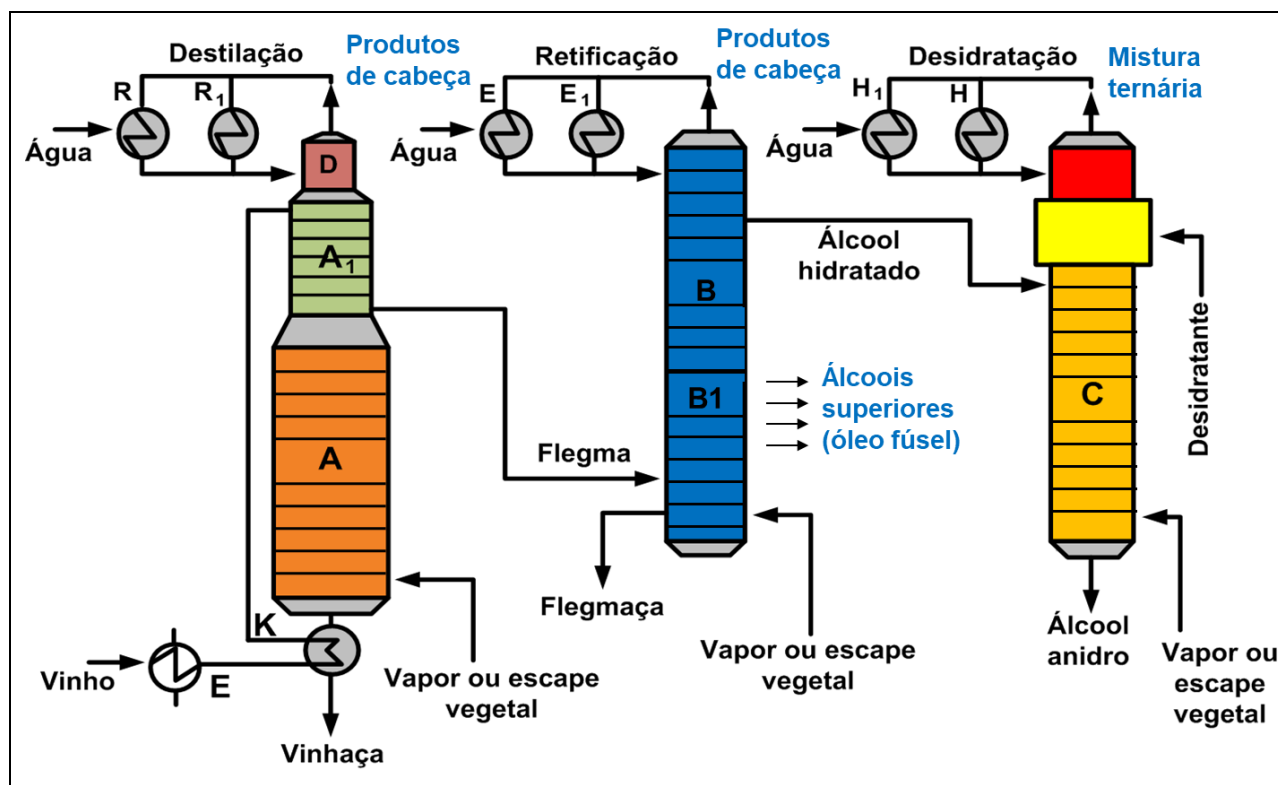


Figura 58. Colunas de destilação para produção de etanol carburante. A = Coluna de destilação, B = Coluna de retificação, C = Coluna de desidratação.

### 20.1.1. Coluna de destilação (Coluna A)

Quando um vinho é submetido à destilação, resultam o flegma e a vinhaça, também denominado de vinhoto ou restilo. O flegma é uma mistura hidralcoólica com 45 a 50% de etanol, livre das substâncias fixas do vinho e grande parte dos seus componentes de “cabeça”. A vinhaça é o resíduo da destilação do vinho, praticamente esgotado em etanol e que contém as substâncias fixas do vinho e parte dos componentes de “cauda”.

O vinho, antes de entrar na coluna, passa pelos condensadores E da coluna de retificação, atingindo de 65 a 70°C, e depois troca calor com a vinhaça no recuperador K, entrando na coluna a 90-95°C. A primeira etapa da destilação é a epuração do vinho, fase em que são eliminados componentes de “cabeça”, tais como aldeídos e ésteres. Esta operação é realizada na coluna A1 e

os produtos são concentrados na coluna D. Da coluna de epuração (A1) resultam o vinho epurado e uma fração denominada álcool bruto, de segunda ou de cabeça, caracterizado por uma mistura hidralcoólica impura com 90% de etanol (v/v), concentrada na coluna D e posteriormente condensada. O vinho epurado passa para a coluna A, onde por destilações sucessivas é esgotado em etanol, resultando o flegma (produto principal da destilação, com 45-50% de etanol (v/v) na mistura hidralcoólica) e a vinhaça (resíduo aquoso da destilação do vinho, contendo as substâncias fixas do vinho e parte das voláteis de “cauda”) (Figura 59).

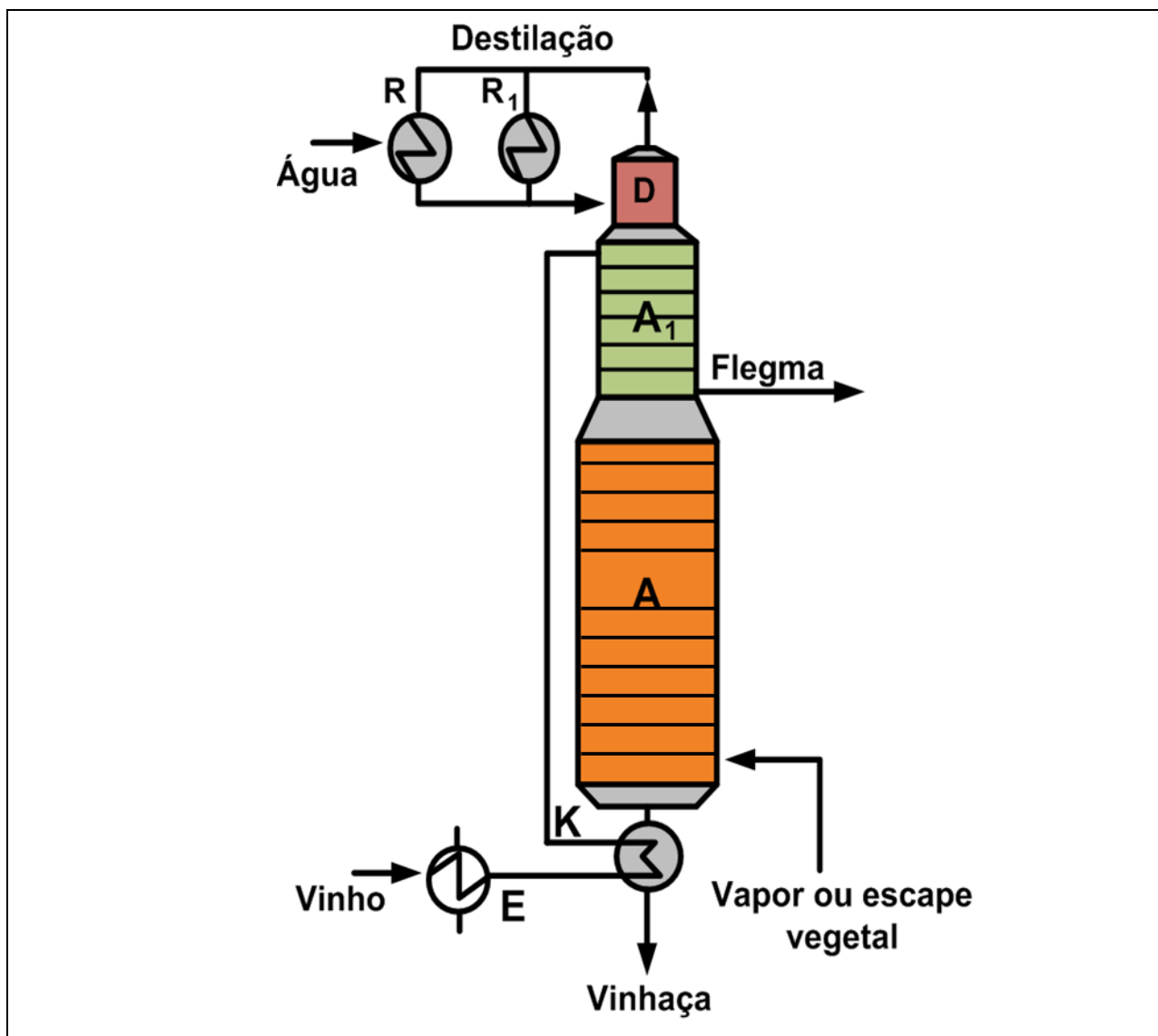


Figura 59. Coluna de destilação (A).

A coluna A, que é a coluna de esgotamento do vinho em etanol, é de maior diâmetro e possui de 16 a 18 bandejas. As suas bandejas podem ser calotadas, perfuradas ou valvuladas. A coluna A1, que é a coluna de purificação do vinho, possui de 6 a 8 bandejas. A coluna D, que é a de retrogradação e concentração de produtos de cabeça, possui 6 bandejas perfuradas.

O controle da destilação é feito pela medida das temperaturas na base e no topo da coluna. As temperaturas normais de funcionamento são 94°C no topo e de 108 a 110°C na base. Através do controle da entrada de vapor, do fluxo de vinho e da retirada de vinhaça, pode-se também regular o grau alcoólico do flegma e a perda de etanol na vinhaça.

#### 20.1.2 Coluna de retificação (Coluna B)

O produto da destilação do vinho é o flegma, que é uma mistura hidralcoólica contendo pequena parte de componentes de “cabeça” e os álcoois superiores [substâncias muito solúveis em etanol por afinidade e que se comportam como de componentes de “cabeça” em grau alcoólico baixo ( $K > 1$ ) e como componentes de “cauda” em grau alcoólico mais alto ( $K < 1$ )]. Para a purificação e concentração do flegma, é realizada uma nova destilação, denominada retificação, na coluna B.

O produto principal da retificação é o etanol hidratado ou retificado (mistura hidralcoólica de elevada pureza em etanol, 93,6% (v/v) para o etanol hidratado carburante e 94,4% (v/v) para o etanol hidratado industrial. Da retificação resultam ainda a flegmaça (resíduo aquoso), o óleo fúsel (mistura de impurezas do flegma, os álcoois superiores) e o álcool bruto ou de segunda.

A retificação é limitada quanto à máxima concentração de etanol da mistura possível de ser atingida nos aparelhos convencionais, que é de 97,6% (v/v), devido à formação de uma mistura homogênea (mistura azeotrópica) entre a água e o etanol, com ponto de ebulição constante e inferior ao dos componentes isolados da mistura. Assim, toda vez que o líquido de um prato numa coluna de destilação atingir a concentração do azeótropo, a mistura se comporta como uma substância pura gerando vapores de mesma composição que o líquido gerador, impedindo, portanto, a separação e a concentração em etanol.

O flegma proveniente da coluna A segue na forma de vapor à coluna B1, onde desce de bandeja em bandeja desalcoolizando-se. Pela base da coluna é retirada a flegmaça. Os vapores alcoólicos formados na coluna B1 sobem para a coluna B, já isentos dos álcoois superiores (retirados). Pelo topo da coluna B são separados componentes de “cabeça” residuais, que passaram pela coluna A por apresentarem coeficiente  $K < 1$  em destilações com grau alcoólico baixo e  $K > 1$  em destilações com grau alcoólico alto. O etanol hidratado, com 93,6 a 94,4% (v/v), é retirado, na forma líquida, de bandejas um pouco abaixo do topo da coluna B e é enviado ao resfriamento. A fração que passa na forma de vapor pelo topo da coluna B (componentes de “cabeça”) é condensada nos condensadores E, juntando-se ao álcool de segunda proveniente dos condensadores R (Figura 60).

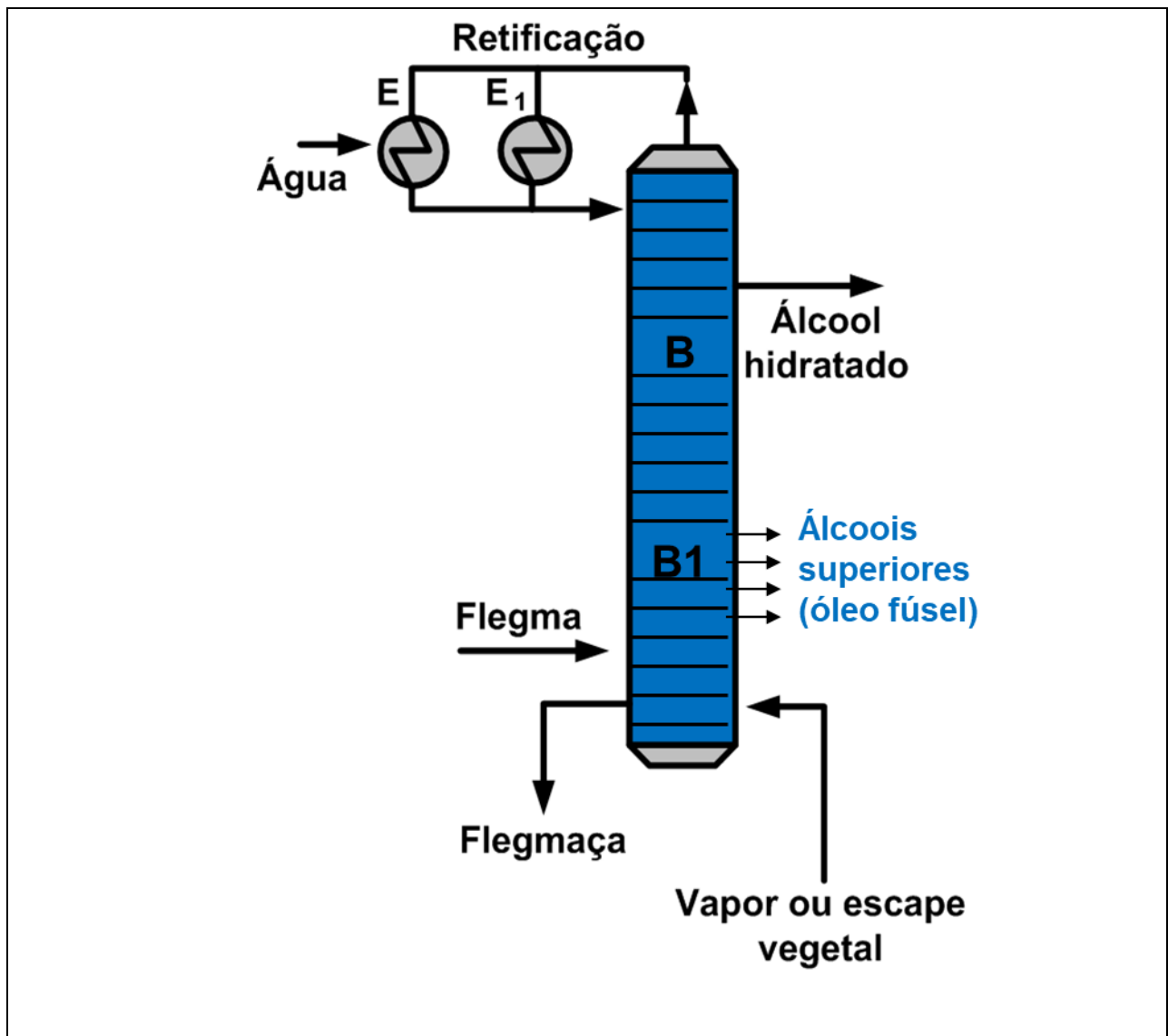


Figura 60. Coluna de retificação (B).

O óleo fúsel (álcoois superiores), que é bloqueado na coluna de retificação pelo efeito da temperatura e da solubilidade, é retirado por sucção das bandejas do topo de coluna B1 (óleos baixos) e da base da coluna B (óleos altos) e é enviado ao resfriador/lavador de óleo fúsel. Os óleos altos são resfriados e enviados ao depósito. Os óleos baixos são resfriados e enviados ao lavador, onde se formam duas fases, uma superior constituída pelos óleos, que são menos densos que a mistura hidralcoólica, e outra inferior constituída pelas chamadas águas fracas (mistura hidralcoólica com 8 a 10% v/v). A fase superior (óleos baixos) é retirada por um funil e enviada ao depósito. As águas fracas são retornadas à coluna B1.

A retirada do óleo fúsel nas bandejas próximas à união da coluna B com a B1 é possível porque seus componentes (álcoois superiores) se acumulam nestas bandejas devido aos seus coeficientes K (Teoria de Barbet). Tais componentes, sob destilação em grau alcoólico mais baixo acompanham o etanol por solubilidade preferencial ( $K > 1$ ) e, sob destilação em grau

alcoólico alto se acumulam no líquido gerador ( $K < 1$ ) de bandejas específicas na coluna B, sendo retirados da coluna, proporcionando a purificação do etanol hidratado.

### 20.1.3. Desidratação do etanol hidratado

A desidratação do etanol hidratado pode ser realizada mediante processo azeotrópico na coluna de desidratação (coluna C) com a adição de um desidratante ou através de peneiras moleculares.

#### 20.1.3.1. Coluna de desidratação (Coluna C)

Para se obter o etanol anidro ou desidratado, com teor alcoólico variando de 99,3 a 99,5% (v/v), é necessário introduzir aos processos normais de destilação um desidratante que propicie o fracionamento da mistura azeotrópica do etanol hidratado, de modo a alterar a sua composição.

O etanol hidratado é uma mistura azeotrópica, em equilíbrio de fases, do qual não se consegue o fracionamento de seus componentes por destilação simples, pois o vapor tem a mesma composição do líquido gerador devido ao ponto de ebulição da mistura ser menor que o dos componentes isoladamente. Devido ao equilíbrio entre água e etanol nas fases líquida e de vapor da mistura hidralcoólica azeotrópica, os vapores provenientes da sua ebulição possuem a mesma concentração de etanol que a mistura hidralcoólica original. Portanto, não se consegue aumento de grau alcoólico da mistura através de destilação simples.

Os processos físico-químicos que deslocam ou mesmo suprimem o ponto de azeotropismo do etanol hidratado são os mais recomendados para a sua desidratação a etanol anidro. Antigamente utilizava-se o benzol como desidratante do etanol hidratado, porém, como o benzol possui alta toxidez, foi substituído pelo ciclohexano.

Quando o desidratante entra em contato com o etanol retificado, formam-se novas misturas azeotrópicas, sendo as mais importantes a ternária (água-etanol-ciclohexano) e a binária (etanol-ciclohexano). As novas misturas possuem ponto de ebulição diferentes e menores que o do etanol. Assim, após destilação, o etanol anidro é retirado pela base da coluna C, como um “resíduo” desta destilação.

Para a produção do etanol anidro, o etanol hidratado retirado da coluna B, ao invés de seguir para a resfriadeira, é enviado à coluna de desidratação (coluna C). O ciclohexano é introduzido acima do ponto de admissão do etanol hidratado e, descendo na coluna, mistura-se com o etanol hidratado, estabelecendo nesta coluna três zonas distintas:



- na parte superior da coluna forma-se a mistura ternária (ponto de ebulição = 64,9°C), composta de:
  - água = 7,4%
  - etanol = 18,5%
  - ciclohexano = 74,1%
  
- na parte intermediária da coluna forma-se a mistura binária (ponto de ebulição = 65,3°C), composta de:
  - etanol = 32,4%
  - ciclohexano = 67,6%
  
- na parte inferior da coluna isola-se o etanol anidro, pois toda a água do etanol hidratado fica associada à mistura ternária no topo da coluna C e todo o ciclohexano fica associado às misturas ternária e binária (intermediária na coluna) (Figura 61).

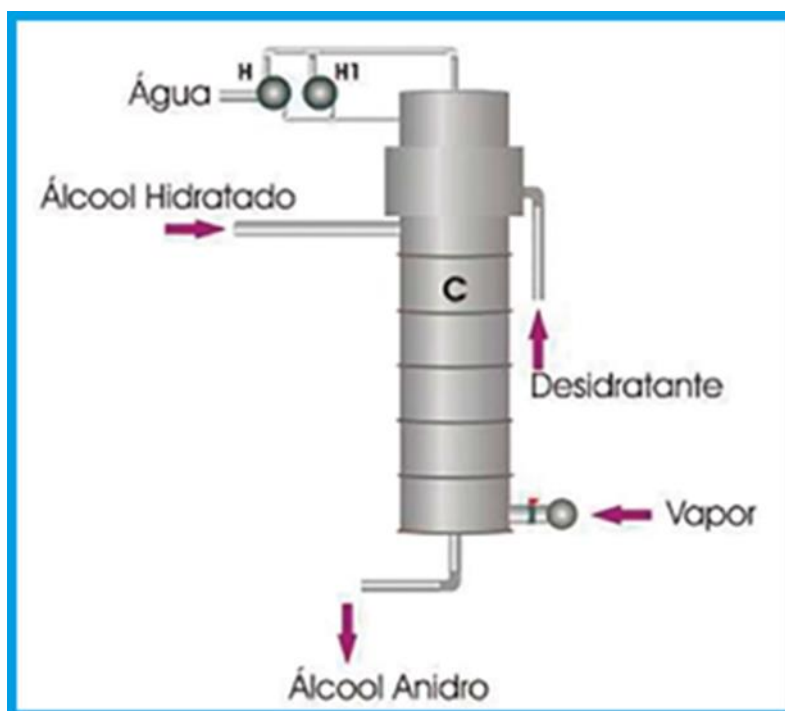


Figura 61. Coluna de desidratação (C).

O etanol anidro é retirado como “resíduo” pela base da coluna C, sendo enviado ao resfriamento (Figura 61). Do topo da coluna, a mistura ternária é retirada e enviada aos condensadores H e retorna à coluna C, passando previamente por um decantador localizado no topo desta coluna, visando a separação dos seus componentes em duas camadas:

- camada superior (rica em ciclohexano), que corresponde a 84% do ternário, composta de:
  - etanol = 15%
  - ciclohexano = 84,5%
  - água = 0,5%
  
- camada inferior, que corresponde a 16% do ternário, composta de:
  - etanol = 56%
  - ciclohexano = 12%
  - água = 32%

A camada superior (rica em ciclohexano) retorna para o interior da coluna C para proceder nova desidratação. A camada inferior, mistura hidralcoólica pobre em ciclohexano, é enviada para a coluna de recuperação de ciclohexano (coluna P). Na coluna P, o ternário é restabelecido no topo, consumindo todo o ciclohexano. Em seguida é enviado aos condensadores e posteriormente retorna ao topo da coluna C. Na base da coluna P forma-se uma mistura água e etanol que retorna à coluna B1. A coluna C, coluna desidratadora, possui 44 bandejas e a coluna P, recuperadora de desidratante, possui de 26 bandejas.

#### 20.1.3.2. Peneira molecular

A desidratação do etanol hidratado pode também ser realizada através de peneiras moleculares, compostas de zeólitas (Figura 62). Os poros da estrutura de zeólitas possui 3 Å (Angstrom) de diâmetro. A molécula da água tem um diâmetro de 2,8 Å e a molécula de etanol tem um diâmetro de 4,4 Å. O fluxo de etanol hidratado através da peneira molecular propicia a entrada de moléculas de água nos poros das zeólitas, aprisionando-as, e possibilitando a passagem das moléculas de etanol, cujo diâmetro é maior do que os poros das zeólitas da peneira molecular. Assim, o etanol hidratado se desidrata e transforma-se em etanol anidro (Figura 63).

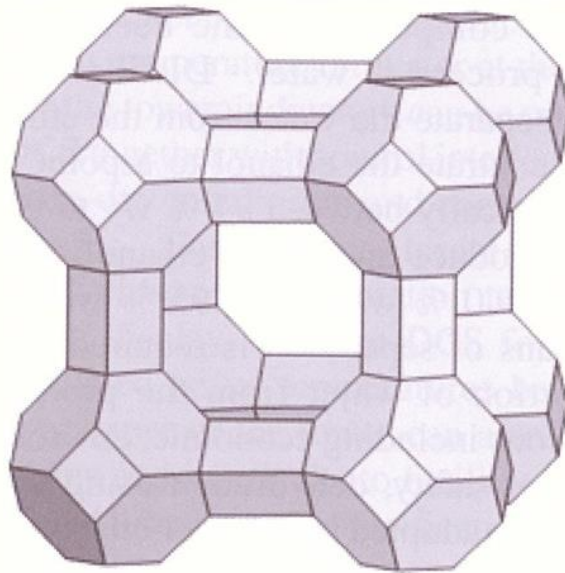


Figura 62. Zeólita tipo 3A que compõe a peneira molecular.

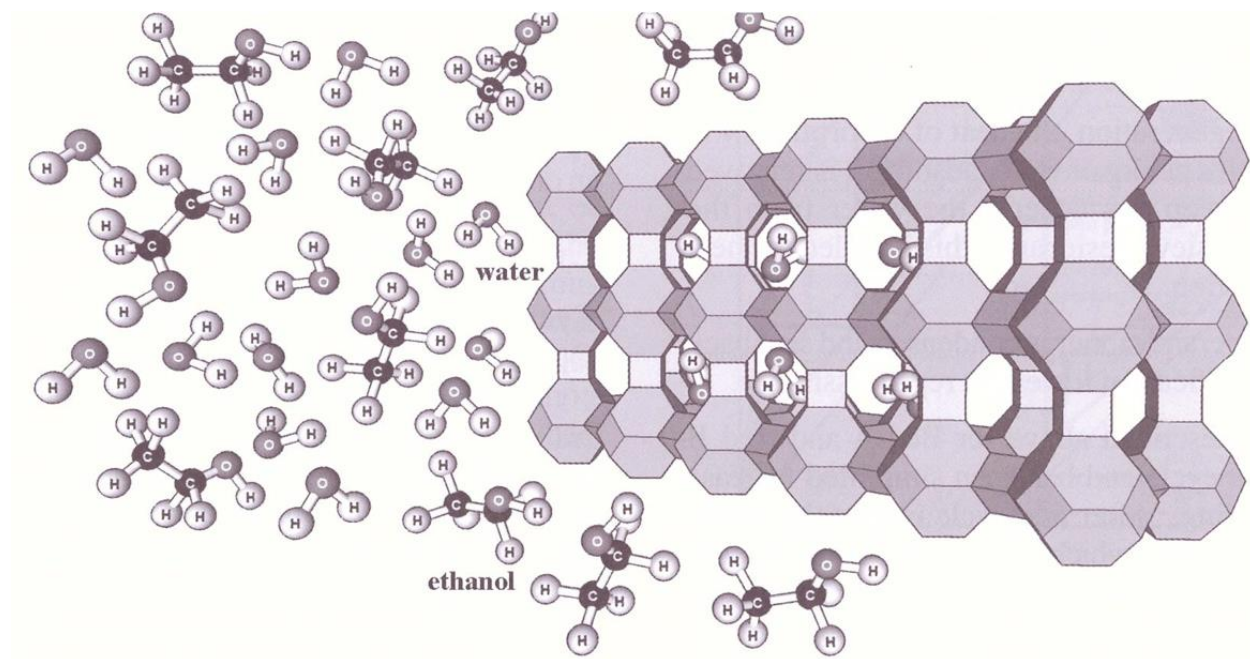


Figura 63. Adsorção de água do etanol hidratado usando peneira molecular.

## 21. CLASSIFICAÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DO ETANOL

As Tabelas 9 e 10 mostram os tipos de álcool etílico, suas terminologias, principais finalidades e especificações. A legislação brasileira estipula a comercialização do etanol em porcentagem em massa a 20°C, definida como °INPM (Instituto Nacional de Pesos e Medidas).

Tabela 9. Tipos de álcool etílico, suas terminologias e principais finalidades.

<b>Tipo</b>	<b>Terminologia</b>	<b>Utilização</b>
ANIDRO	Mistura hidroalcoólica, cujo principal componente é o álcool etílico ou etanol, com teor alcoólico mínimo de 99,3° INPM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aditivo oxigenante da gasolina</li> <li>• Matéria-prima da indústria de solventes, tintas e vernizes</li> </ul>
HIDRATADO	Mistura hidroalcoólica, cujo principal componente é o álcool etílico ou etanol, com teor alcoólico mínimo de 92,6° INPM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustível dos veículos de passeios e comerciais leves</li> <li>• Matéria-prima das indústrias de bebida, alcoolquímica e farmacêutica</li> <li>• Produto de limpeza doméstica</li> </ul>

Tabela 10. Especificações dos tipos de álcool etílico combustível.

Tipos de Etanol - RESOLUÇÃO Nº 764, DE 20 DE DEZEMBRO DE 2018				
<b>Características</b>	<b>Unidade</b>	<b>Anidro (AER)</b>	<b>Hidratado (AHR)</b>	<b>Método de Análise</b>
Aspecto		Límpido e isento de material particulado		Visual
Cor		Incolor		Visual
Massa específica a 20° C	kg/m <sup>3</sup>	791,5 máx	805,2 - 811,2	NBR 5992 NBR 15639 ASTM D4052
Teor alcoólico	° INPM	mín 99,3	92,5 - 94,6	NBR 5992 NBR 15639
Condutividade elétrica	µS/m		300 máx	NBR 10547 ISO 17308
Índice de acidez, em ácido acético	mg/L		30 máx	NBR 9866 ISO 17315
Teor de aldeídos, em acetaldeído	mg/L		60 máx	ISO 1388-4 (2)
Teor de álcoois superiores	mg/L		500 máx	EN 15721 (2)
Teor de ésteres, em acetato de etila	mg/L		100 máx	ASTM D1617 (2)
Resíduo por evaporação	mg/100mL		5 máx	NBR 8644
Teor de sulfato	mg/kg		4 máx	NBR 10894
Teor de sódio	mg/kg		2 máx	NBR 10422
Teor de hidrocarbonetos	% v/v		não detectado	NBR 13993
Teor de metanol	% v/v		0,5 máx	NBR 16041
Teor de etanol	% v/v	98,0 mín	94,5 mín	NBR 16041 ASTM D5501
Teor de água	% m/m	0,7 máx	7,5 máx	NBR 15531 NBR 15888 ASTM E203 ASTM E1064
Potencial hidrogeniônico	pH a 20°C	-	6 a 8	NBR 10891

## 22. CACHAÇA

Os primeiros engenhos de cana-de-açúcar do Brasil se estabeleceram no Brasil por volta de 1532. O solo fértil e o clima quente e úmido proporcionaram o rápido desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar na região litorânea do nosso país.

A aguardente de cana, a princípio um produto secundário da indústria açucareira, ganhou importância econômica e social na época colonial, chegando a ser um importante produto nas trocas comerciais e um dos fatores que levou à união do povo pela reivindicação da Independência do Brasil.

Anualmente são produzidos cerca de 800 milhões de litros de cachaça no Brasil, para uma capacidade instalada de produção de 1,7 bilhão de litros. É a quarta bebida destilada mais produzida no mundo. No entanto, menos de 1% da sua produção é exportada. A adoção de boas práticas de fabricação, o uso de equipamentos adequados e novas tecnologias melhoraram a qualidade da bebida. Como consequência, a cachaça foi valorizada e surgiram novos mercados consumidores. Atualmente ela já pode ser comparada aos mais nobres destilados do mundo.

Estima-se que há mais de 40 mil produtores e mais de 5 mil marcas de cachaça no país. O faturamento aproximado do setor é de US\$ 600 milhões ao ano, gerando cerca de 600 mil empregos diretos e indiretos. Da totalidade da área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil, aproximadamente 2,5% (225 mil ha) é destinada à produção de cachaça.

O Decreto Federal 6.871, de 4 de junho de 2009, regulamenta a Lei 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. A Instrução Normativa n. 13, de 29 de junho de 2005, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), estabelece o Padrão de Identidade e Qualidade (PIQ) para a aguardente de cana-de-açúcar e para a cachaça. As principais definições presentes nessas instruções normativas estão descritas a seguir.

***Aguardente de cana*** é a bebida com graduação alcoólica entre 38 e 54% (em volume, v/v) à temperatura de 20°C, obtida do destilado alcoólico simples de cana-de-açúcar ou pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar.

***Destilado alcoólico simples de cana-de-açúcar***, destinado à produção da aguardente de cana, é produto obtido pelo processo de destilação simples ou por destilo-retificação parcial seletiva do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar, com graduação alcoólica entre 54 e 70% (v/v) à temperatura de 20°C.

**Cachaça** é a denominação típica e exclusiva da aguardente de cana produzida no Brasil, com graduação alcoólica entre 38 e 48% (v/v) à temperatura de 20°C, obtida pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar, com características sensoriais peculiares.

A diferenciação legal entre aguardente de cana e cachaça está, portanto, na concentração alcoólica máxima permitida para cada uma dessas bebidas, 54% vol. para a aguardente e 48% vol. para a cachaça. No entanto, são raras as aguardentes com concentração alcoólica superior a 48% vol. Portanto, a principal diferença entre ambas é o líquido de origem. A aguardente pode ser produzida a partir do mosto fermentado do caldo ou do destilado alcoólico simples de cana-de-açúcar. Já a cachaça deve ser produzida exclusivamente a partir do mosto fermentado de caldo de cana.

O padrão de identidade e qualidade (PIQ), estabelecido pela legislação, com seus respectivos limites têm a finalidade de padronizar a composição química da bebida e proteger a saúde do consumidor. No processo de produção da cachaça são formados componentes voláteis “não álcool”, compostos secundários denominados coeficiente de congêneres (Tabela 11). Algumas substâncias que podem estar presentes na bebida são consideradas contaminantes orgânicos e inorgânicos (Tabela 12).

Tabela 11. Composição química (mg/100mL de álcool anidro) e requisitos de qualidade da cachaça e da aguardente de cana-de-açúcar, estabelecidos pela legislação brasileira.

COMPONENTE	LIMITES	
	mínimo	máximo
Acidez volátil, em ácido acético	-	150
Ésteres, em acetato de etila	-	200
Aldeídos, em aldeído acético	-	30
Furfural + 5-hidroximetilfurfural	-	5
Álcoois superiores *	-	360
Coeficiente de congêneres **	200	650

\* Álcoois superiores = soma dos álcoois isobutílico (2-metil-propanol), isoamílicos (2-metil-1-butanol e 3-metil-1-butanol) e n-propílico (1-propanol).

\*\* Coeficiente de congêneres = soma da acidez volátil, ésteres, aldeídos, furfural + 5-hidroximetilfurfural e álcoois superiores.

Tabela 12. Composição máxima permitida de contaminantes na cachaça e na aguardente de cana-de-açúcar, estabelecida pela legislação brasileira.

<b>CONTAMINANTES</b>	<b>UNIDADE</b>	<b>LIMITE MÁXIMO</b>
<b>ORGÂNICOS</b>		
Álcool metílico	mg / 100 mL álcool anidro	20
Acroleína (2-propenal)	mg / 100 mL álcool anidro	5
Álcool sec-butílico (2-butanol)	mg / 100 mL álcool anidro	10
Álcool n-butílico (1-butanol)	mg / 100 mL álcool anidro	3
Carbamato de etila	µg / L da bebida	210
<b>INORGÂNICOS</b>		
Cobre	mg / L da bebida	5
Chumbo	µg / L da bebida	200
Arsênio	µg / L da bebida	100

Tanto a aguardente de cana quanto a cachaça podem ser adicionadas de açúcares até 6,0 g/L, expressos em sacarose. Caso contenham quantidade superior a 6,0 g/L e inferior a 30 g/L, devem obrigatoriamente ser rotuladas com a palavra “adoçada”.

## 22.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO

A matéria-prima para a indústria de cachaça é caracterizada como colmos de cana-de-açúcar em adequado estágio de maturação. Na indústria, a cana-de-açúcar é moída, separando o caldo do bagaço. O caldo é peneirado, decantado para a separação do bagacilho e diluído para ajustar a concentração de sólidos solúveis (Brix), passando a se chamar mosto. O mosto é fermentado pela ação de leveduras (fermento). Em seguida, o mosto fermentado, chamado de vinho, é destilado, procedendo a separação das frações “cabeça”, “coração” e “cauda”. A fração “coração”, que dará origem à cachaça ou aguardente de cana, pode ser armazenada ou envelhecida (Figura 64).

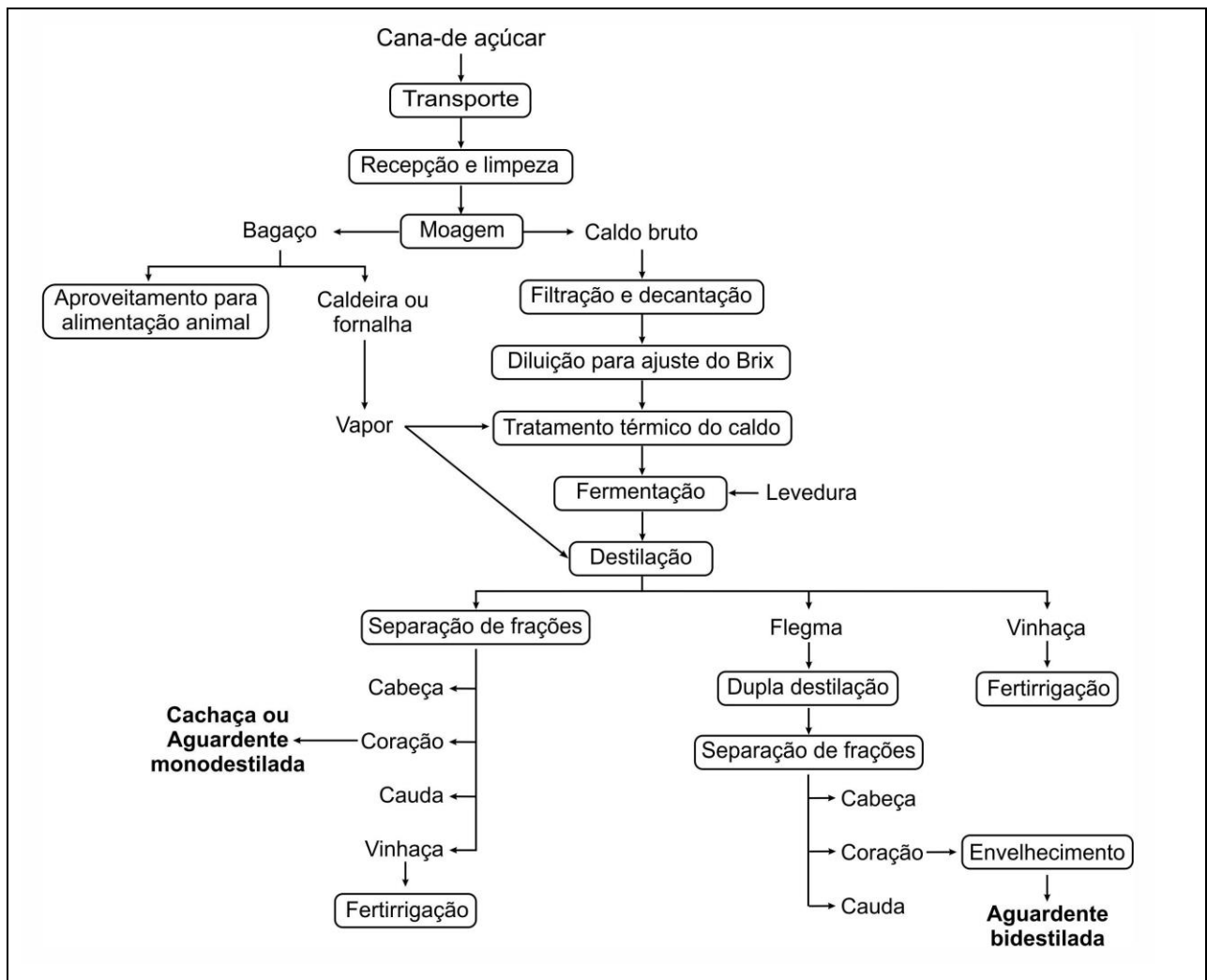


Figura 64. Fluxograma da cadeia produtiva de cachaça e de aguardente de cana.

A queima dos canaviais, prática que facilita a colheita, é prejudicial à qualidade da matéria-prima, pois acelera a sua deterioração tecnológica (inversão da sacarose) e microbiológica (contaminação interna devido às rachaduras do colmo ocasionadas pelo calor da queima). A qualidade do destilado também decai, pois pode apresentar maiores concentrações de furfural e hidroximetilfurfural, além de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e metanol, compostos contaminantes.

Para minimizar as deteriorações fisiológicas do colmo e o desenvolvimento de microrganismos contaminantes, a cana deve ser moída até, no máximo, 24 horas após a colheita. A moagem visa a extração do caldo existente nos colmos. As moendas são basicamente constituídas por três rolos, cujo centro dos eixos estabelece o desenho de um triângulo escaleno. As canas, inteiras ou preparadas por picadores e desintegradores, são introduzidas pela abertura de entrada (entre os rolos superior e anterior), e submetidas ao primeiro esmagamento. A entrada da cana picada na moenda pode ser auxiliada por um rolo de pressão instalado sobre o rolo de entrada, ou por um reservatório de cana picada, chamado *Donnelly*. Após o primeiro



esmagamento a massa de cana é conduzida com o auxílio da bagaceira ao segundo esmagamento (entre os rolos superior e posterior).

Os pequenos produtores de cachaça realizam a extração do caldo da cana em uma única moenda, com alimentação manual de canas inteiras. Neste caso, a eficiência da extração é de apenas 60% a 65%, isto é, 35% a 40% do caldo contido nos colmos de cana fica remanescente no bagaço. Na sequência, o caldo extraído deve ser peneirado para separar os resíduos de bagaço e as folhas provenientes da matéria-prima e depois decantado, para que as partículas sólidas mais densas (areia e terra), remanescentes no caldo peneirado, se desloquem para o fundo do decantador e o bagacilho, menos denso que o caldo, fique retido na parte superior das aletas do tanque decantador (Figura 65).

Os grandes produtores utilizam uma sequência de até 4 ternos de moenda para a extração do caldo, sendo que o bagaço recebe embebição (adição de água e/ou caldo diluído) entre um terno e outro para recuperar o açúcar retido em suas fibras, aumentando assim a eficiência de extração para até 95%. Em seguida, o caldo extraído passa por peneiras fixas, rotativas ou vibratórias e decantadores, para a separação das partículas sólidas em suspensão no caldo.

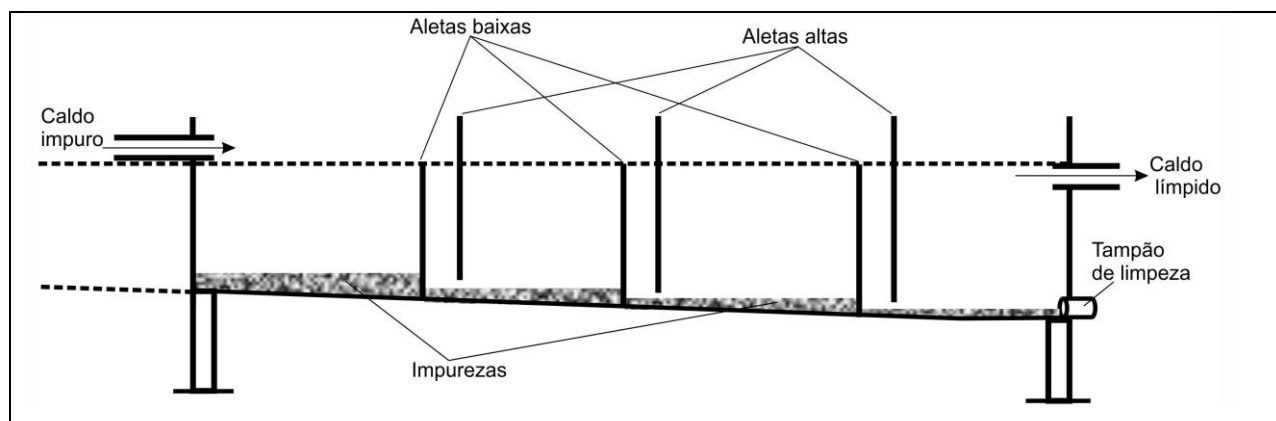


Figura 65. Esquema do decantador de caldo extraído.

A presença de areia e terra no caldo extraído causa o desgaste dos equipamentos e tubulações, e os resíduos de bagaço e as folhas podem ser fonte de contaminação microbológica do mosto, além de serem precursores da formação de furfural e metanol durante o processo de produção da cachaça.

O caldo extraído da cana colhida no ponto ideal de maturação normalmente apresenta concentração de sólidos solúveis (Brix) entre 20 e 22. O grau Brix ideal do mosto para fermentação é de 16 a 18. Assim, quando necessário o caldo extraído deve ser diluído em água potável e de clorada para que seu Brix fique dentro da faixa ideal para fermentação.

O pH do caldo extraído de canas maduras e sadias varia entre 5,4 e 5,8 e a acidez total deve estar entre 2,5 e 3,0 g de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por litro de caldo. O caldo de cana normalmente contém todos os nutrientes necessários para o desenvolvimento das leveduras. Se necessário, a adição de 0,1 g/L de superfosfato e sulfato de amônio auxilia a boa ação do fermento. As leveduras são capazes de sintetizar as vitaminas de que necessitam para o bom desempenho do seu metabolismo.

#### 22.1.1. Fermentação

A fermentação alcoólica para a produção de cachaça é realizada por leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae*. Pela fermentação alcoólica, os açúcares do mosto são convertidos pelas leveduras em etanol e gás carbônico como produtos principais, e em diversos outros compostos secundários, tais como glicerol, aldeídos, ésteres, ácidos orgânicos e álcoois.

Antes de iniciar o processo de fermentação é necessário adicionar uma suspensão inicial de leveduras nas dornas de fermentação, que deve apresentar determinadas características para garantir a produtividade fermentativa. Essa massa de células utilizada para iniciar o processo fermentativo denomina-se pé-de-cuba ou fermento.

O fermento deve apresentar alta velocidade de fermentação, tolerância ao álcool produzido, baixa produção de espuma, resistência à acidez e à temperatura elevada, alta viabilidade durante os ciclos fermentativos e estabilidade genética.

Os fermentos mais empregados na prática são: *fermentos naturais* (caipira), *fermentos prensados* (de panificação) e *fermentos secos* (selecionados).

***Fermento natural, selvagem ou caipira:*** é constituído por células de leveduras que já estão naturalmente adaptadas ao ambiente de cultivo da cana e de produção da cachaça. São encontradas nas superfícies dos colmos, na bainha das folhas e no solo da cultura e chamadas leveduras naturais, nativas ou selvagens. O fermento caipira resume-se no aproveitamento das leveduras naturais do caldo de cana, multiplicadas por tratamento de estímulo à ativação e crescimento.

***Fermento prensado:*** conhecido como fermento de panificação, é constituído por uma massa sólida com um aglomerado de células de levedura da espécie *Saccharomyces cerevisiae*.

***Fermento seco (selecionado):*** Trata-se dos fermentos selecionados para a produção de cachaça disponíveis no mercado. O fermento selecionado consiste em cepas de levedura isoladas do processo de produção de cachaça que apresentaram características favoráveis em testes de

laboratório quanto ao rendimento e à produtividade fermentativa, tolerância à temperatura, acidez e teores alcoólicos e quanto à qualidade química e sensorial do vinho produzido.

O mosto de caldo de cana é transferido para os tanques de fermentação (dornas), os quais já estão com o fermento (pé-de-cuba). Visando evitar estresse osmótico às células de levedura, o ideal é que essa transferência seja feita lentamente, de 6 a 8 horas. Trata-se do sistema de fermentação em “batelada-alimentada”.

Deve-se sempre respeitar o volume útil da dorna (75%-80% do seu volume total) para evitar o transbordamento do mosto por causa da formação de espuma durante o processo de fermentação, resultante da interação do gás carbônico com fosfolipídios e proteínas do mosto.

O ideal é que o processo de fermentação transcorra sob temperaturas de 28°C a 32°C e encerre entre 14 e 18 horas após terminar a alimentação da dorna. Sistemas de aquecimento e/ou refrigeração são importantes para o controle da temperatura da fermentação. O ciclo fermentativo se completa quando a emissão de CO<sub>2</sub> diminui significativamente e o fermento suspenso no mosto tende a decantar no fundo da dorna. O processo de decantação permite separar o vinho do fermento, o qual pode ser reaproveitado no próximo ciclo de fermentação. Este sistema é denominado de fermentação com reciclo de células por decantação (Figura 66). Os grandes produtores podem realizar o reciclo do fermento mediante a centrifugação do mosto fermentado (vinho).

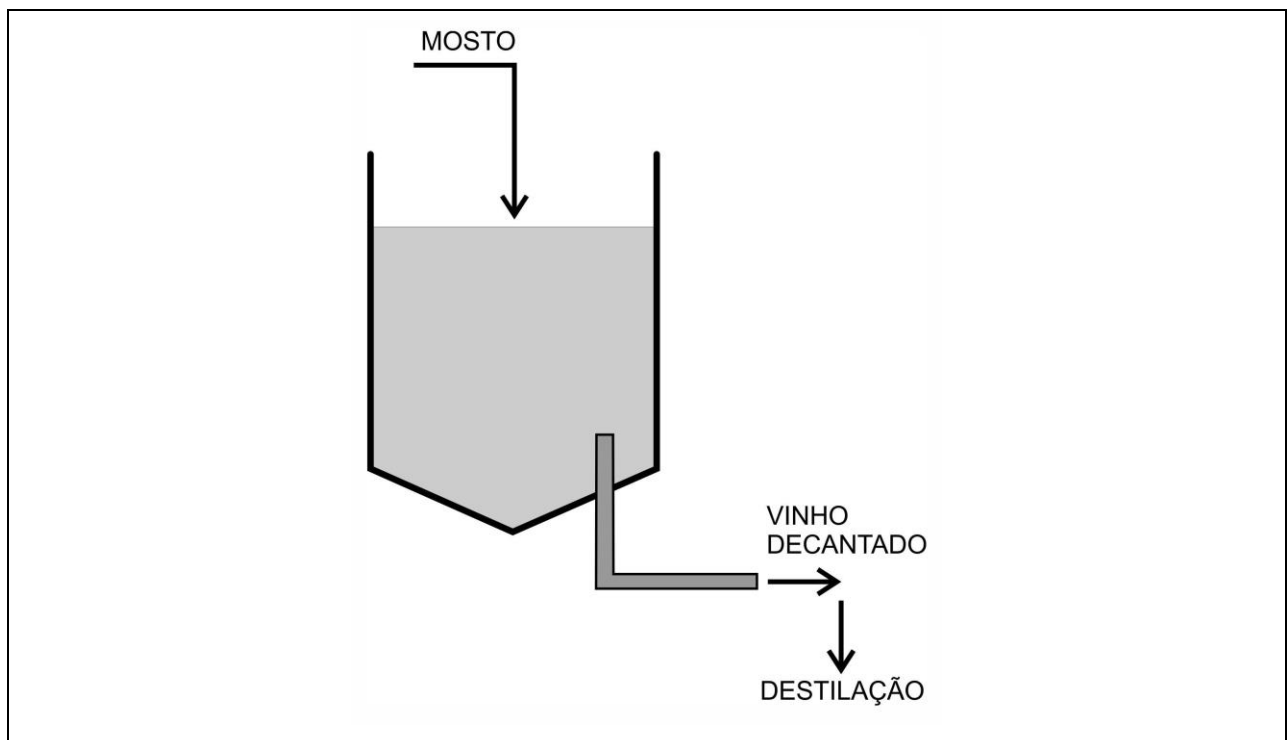


Figura 66. Processo de fermentação por batelada alimentada com reciclo do fermento por decantação.

É importante revigorar o fermento entre os ciclos, mediante a diluição em água e o abaixamento do pH da suspensão para 2,5 a 3,0 com ácido sulfúrico, mantendo esta condição por 2 a 3 horas. Isso auxilia na seleção de células jovens e sadias da levedura, bem como na redução da população de bactérias contaminantes.

O vinho deve ser destilado logo após o término do ciclo de fermentação, evitando assim o desenvolvimento de bactérias contaminantes e as conseqüentes fermentações secundárias, que podem levar ao consumo de etanol e à formação de produtos secundários da fermentação, tais como ácidos orgânicos e álcoois superiores.

#### 22.1.2. Destilação

A destilação consiste no aquecimento de um líquido até sua vaporização, com posterior coleta seletiva dos vapores condensados por resfriamento. O vinho é submetido ao processo de destilação para que haja a separação dos seus componentes voláteis, resultando no aumento da concentração alcoólica e permitindo a purificação mediante à redução de congêneres e de contaminantes do destilado.

O processo de destilação para a produção de cachaça pode ser efetuado em alambiques ou em colunas contínuas. Os alambiques funcionam em sistema intermitente. A caldeira é alimentada com o vinho, o qual, mediante aquecimento, emite vapores hidralcoólicos que são conduzidos através do capitel e da alonga até o condensador, resultando no destilado alcoólico (Figura 67). O resíduo da destilação do vinho, que permanece na caldeira após o término da destilação, chama-se vinhaça, e é composto basicamente por água, pelos componentes não voláteis e por substâncias sólidas remanescentes no vinho, tais como açúcares, sais minerais, bagacilho e células de levedura.

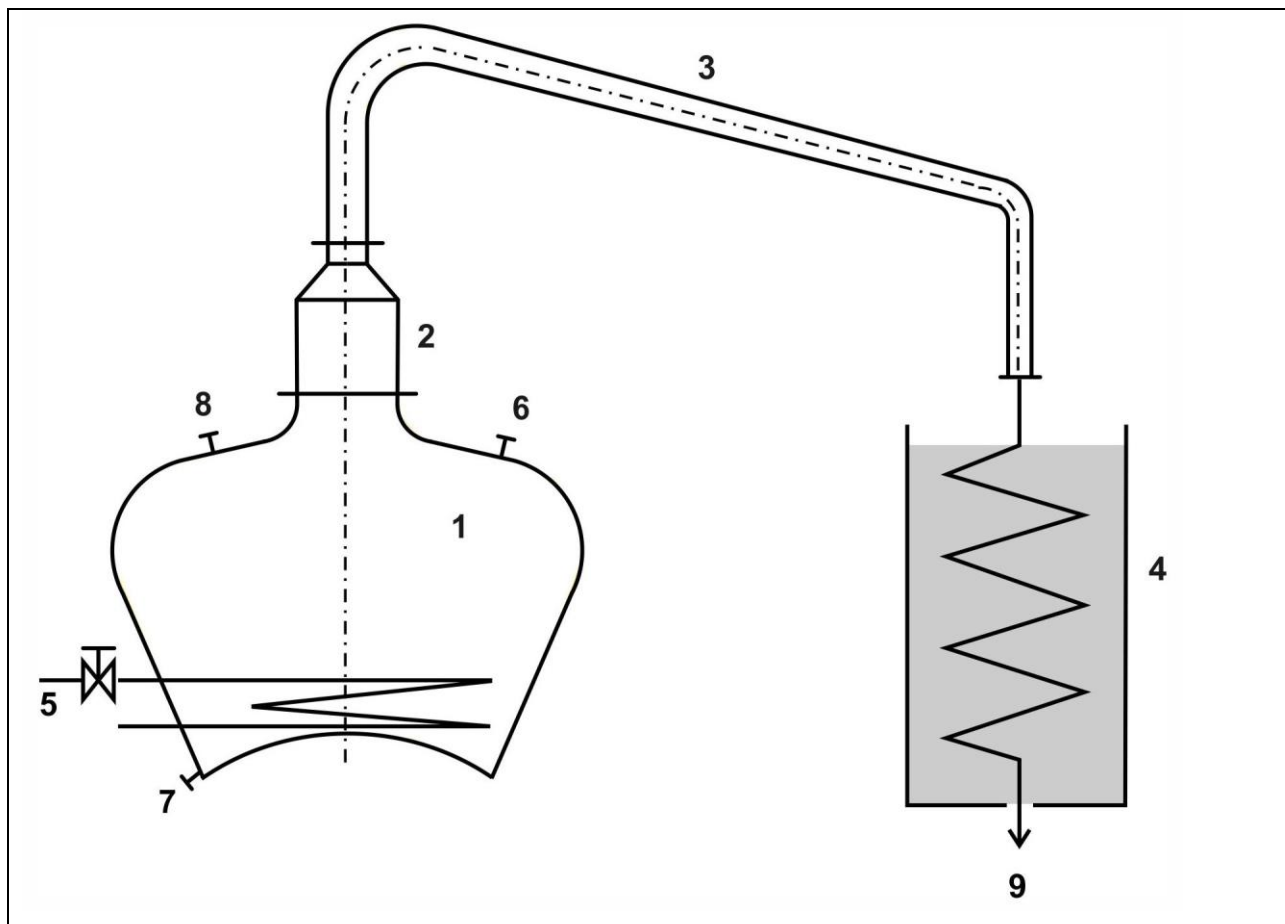


Figura 67. Esquema de alambique simples para a produção de cachaça. (1) caldeira, (2) capitel, (3) longa, (4) condensador/resfriador, (5) vapor para aquecimento, (6) entrada de vinho, (7) descarga de vinhaça, (8) válvula equalizadora de pressão, (9) saída de cachaça.

As colunas de destilação são compostas por uma sequência de pratos superpostos, os quais funcionam como caldeiras independentes. Os vapores hidralcoólicos gerados no prato inferior são conduzidos ao prato superior e assim sucessivamente, até o topo da coluna, de onde são direcionados aos condensadores.

#### 22.1.2.1. Destilação em alambique

No início da destilação do vinho, realiza-se a separação da fração “cabeça”, correspondente a 1-2% do volume útil da caldeira. A fração “coração”, que dará origem à cachaça, corresponde ao destilado recuperado após a fração “cabeça”, e até que o teor alcoólico do destilado na saída do condensador atinja 38% a 40% (v/v), resultando em concentração alcoólica média entre 42% e 48% nesta fração do destilado. A fração “cauda”, também conhecida como “água fraca”, é destilada após a fração “coração” e até que o destilado na saída do condensador apresente ausência de etanol (Figura 68).

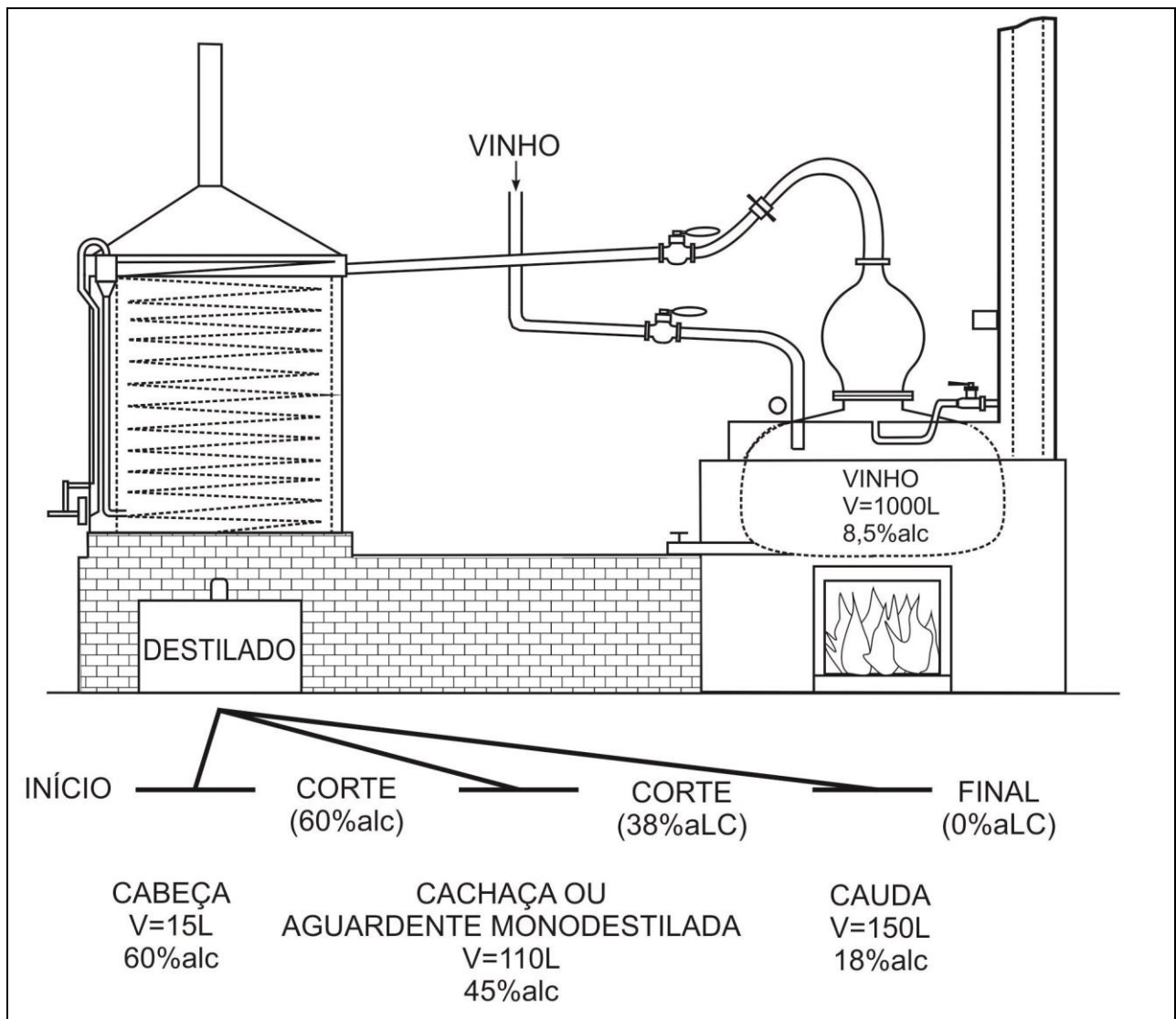


Figura 68. Esquema da destilação normalmente empregada para a produção de cachaça.

As frações “cabeça” e “cauda” devem ser separadas, pois em geral concentram compostos que depreciam a qualidade da bebida. Na fração “cabeça” acumulam-se aldeídos, ésteres e metanol. A fração “cauda” concentra o ácido acético, responsável pela acidez da bebida.

É comum misturar as frações “cabeça” e “cauda” com um novo vinho a ser destilado, para que o etanol presente nessas frações seja recuperado. No entanto, um destino mais apropriado poderia ser a produção de etanol carburante por meio da destilação em alambique provido de coluna concentradora.

Os alambiques são normalmente construídos em cobre por suas características de maleabilidade, resistência e transmissão de calor. Esse metal também participa como catalisador de diversas reações químicas durante a destilação. O cobre catalisa reações de oxidação de compostos sulfurados, minimizando a concentração de dimetilsulfeto, composto responsável por defeito sensorial na bebida.

### 22.1.2.2. Destilação em colunas contínuas

O princípio da destilação contínua em colunas é o da extração vapor-líquido em contracorrente. As colunas (Figura 69) são cilindros verticais formados por um conjunto de bandejas ou pratos com calotas e sifões. Pelas calotas sobem os vapores alcoólicos e pelos sifões desce o vinho. O aquecimento é feito na base da coluna por vapor proveniente de caldeiras. As bandejas superpostas funcionam cada uma como uma alambique independente, uma destilando para dentro da outra imediatamente acima. Descendo, o vinho é aquecido em contracorrente pelos vapores gerados a partir da base da coluna. À medida que o vinho desce na coluna, vai desalcoolizando-se e os vapores alcoólicos formados vão subindo, atingindo as máximas concentrações nas bandejas superiores da coluna.

O vinho a ser destilado entra continuamente pela parte superior da coluna. Da base da coluna sai, também continuamente, vinhaça. Pelo topo da coluna saem os vapores hidralcoólicos concentrados, os quais são condensados e resfriados.

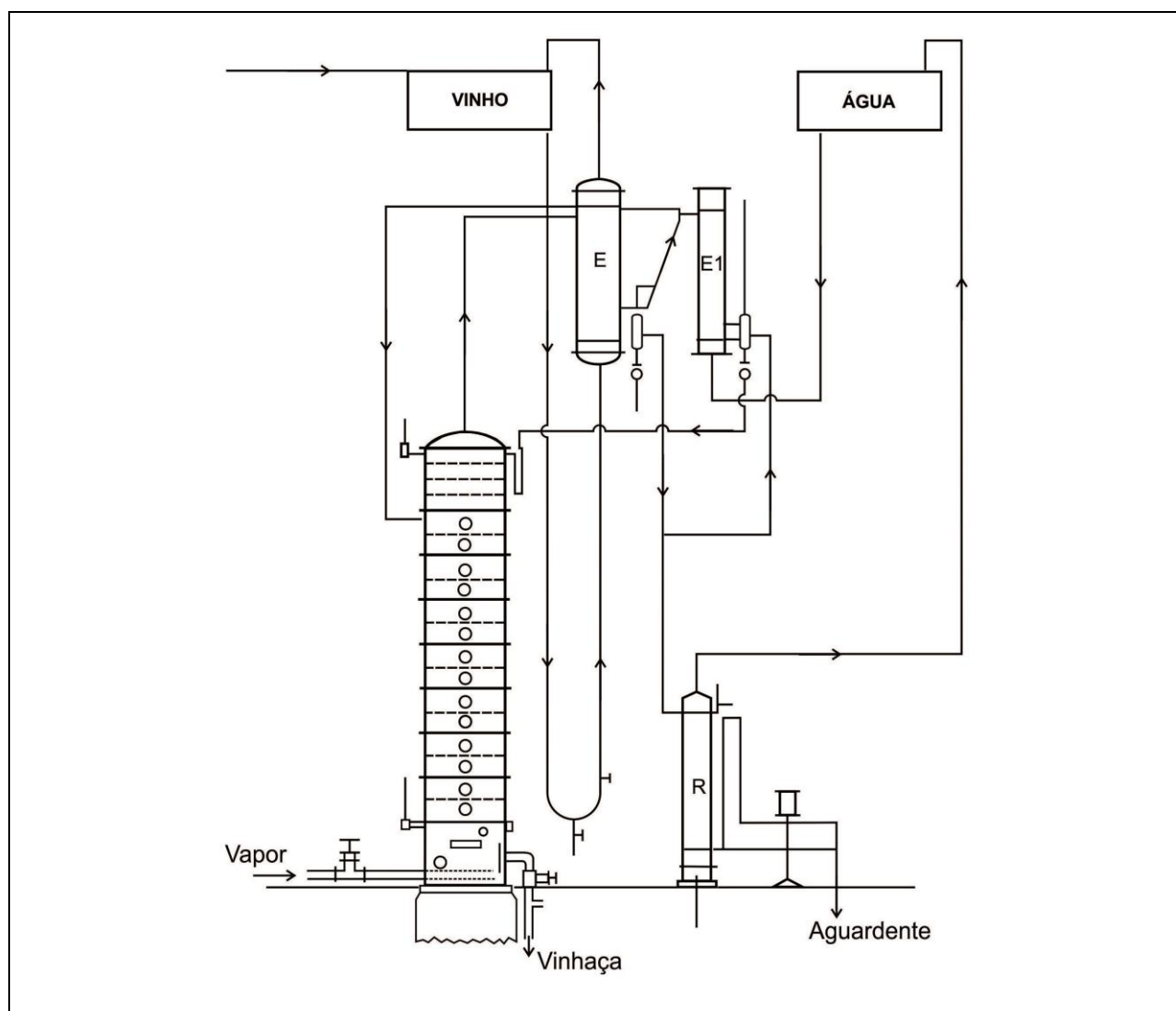


Figura 69. Coluna para produção de cachaça. E e E1 = condensadores; R = resfriador.

### 22.1.3. Envelhecimento

Ao final do processo de destilação obtém-se a cachaça denominada branca. Essa bebida pode ser consumida como está, no entanto, as qualidades sensoriais são aprimoradas se houver o armazenamento por no mínimo 6 meses em recipiente inerte.

A cachaça pode também ser submetida ao envelhecimento, caracterizado por um período de tempo dentro de barril de madeira a fim de afinar o perfil sensorial da bebida e melhorar a sua qualidade.

O processo de envelhecimento de bebidas é um sistema complexo, que envolve numerosas reações fundamentadas principalmente na extração de moléculas da madeira e nas interações com o líquido destilado.

A maturação de bebidas destiladas é o principal fator para a sua caracterização, pois aproximadamente 60% dos compostos aromáticos presentes na bebida são oriundos da madeira ou da interação dela com o destilado, sendo o restante oriundo da matéria-prima ou formados durante a fermentação e a destilação. A evolução de componentes fenólicos, a oxidação da bebida, a estabilização da cor, do sabor e o surgimento do caráter amadeirado contribuem para a riqueza e a complexidade do buquê aromático e, conseqüentemente, resulta em um maior valor agregado às bebidas destiladas.

O carvalho é a principal madeira utilizada para o envelhecimento porque fornece moléculas aromáticas agradáveis às bebidas alcoólicas. No Brasil, além do carvalho importado, madeiras nativas tais como amendoim, araruva, cabreúva (bálsamo), cedro, cerejeira (amburana), freijó, ipê e jequitibá também são usadas para o envelhecimento de cachaça. A produção de barris envolve inicialmente a secagem da madeira e o corte das aduelas. A operação de queima da madeira aplicada durante a produção dos barris tem a finalidade de dar forma às aduelas, auxiliando na sua envergadura e, conseqüentemente, na moldagem do barril. Depois de montado, o barril recebe uma tosta final, que contribui para modificar as estruturas das moléculas da madeira, permitindo o surgimento de novas substâncias aromáticas que conferem sabor diferenciado ao produto.

De acordo com a Instrução Normativa n. 13, de 29 de junho de 2005, a aguardente de cana ou a cachaça pode ter as seguintes denominações:

***Aguardente de cana ou cachaça envelhecida:*** deve conter no mínimo 50% de aguardente de cana ou de cachaça envelhecidos em recipiente de madeira apropriado, com capacidade máxima de 700 litros, por um período não inferior a um ano.

***Aguardente de cana ou cachaça premium:*** deve conter 100% de aguardente de cana ou de



cachaça envelhecidos em recipiente de madeira apropriado, com capacidade máxima de 700 litros, por um período não inferior a um ano.

***Aguardente de cana ou cachaça extra premium:*** deve conter 100% de aguardente de cana ou de cachaça envelhecidos em recipiente de madeira apropriado, com capacidade máxima de 700 litros, por um período não inferior a três anos.

As etapas finais do processo de produção de cachaça envolvem a padronização do destilado, isto é, o ajuste do teor alcoólico da bebida por meio de diluição com água potável. Na sequência, procede-se a filtração da bebida por meio da passagem por filtros de algodão ou celulose para que sejam retidas partículas sólidas, dando ao destilado limpidez, transparência e brilho, e, por fim, realiza-se o engarrafamento da bebida.