

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
ENGENHARIA DE BIOPROCESSOS

BRUNO MARTINS DE CASTRO SOUSA

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE CACHAÇA ARTESANAL NO BRASIL

OURO BRANCO – MG

2015

BRUNO MARTINS DE CASTRO SOUSA

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE CACHAÇA ARTESANAL NO BRASIL

Monografia apresentada em cumprimento
às exigências do Curso de Engenharia de
Bioprocessos da Universidade Federal de
São João del Rei.

Orientadora: Ma. Flávia Donária Reis Gonzaga

OURO BRANCO – MG

2015

A minha irmã, Fernanda, e aos
meus pais, Romildes e José, que
tornaram essa conquista possível.

AGRADECIMENTOS

À Prof. Flávia pela orientação deste trabalho, paciência e ensinamentos.

À Iara e Isabel, pelos bons momentos, companheirismo e ajuda ao longo desses anos.

Aos Professores Edson Nucci, Antonio Totola, Bruna Mara e Isabel Braga, que contribuíram para minha formação acadêmica, pessoal e profissional.

À Profa. Cristiane Finzi, por todas as oportunidades e pelo exemplo.

À Profa. Renata Lofrano, pelos ensinamentos, incentivo e apoio durante a graduação.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação.

RESUMO

O mercado da cachaça artesanal compreende uma produção anual de 1,8 bilhões de litros, cujo consumo ocorre majoritariamente no país. A produção, em alambiques artesanais, envolve uma série de etapas que requerem controle e monitoramento para que as condições de operação e parâmetros envolvidos sejam os melhores possíveis. As condições climáticas da região, as propriedades do solo, a disponibilidade de água e nutrientes são os fatores que mais influenciam na produtividade do canavial. O preparo do pé-de-cuba, que ocorre em condições de aerobiose, deve garantir uma boa quantidade e qualidade das leveduras, as quais são usadas na fermentação, etapa anaeróbia onde ocorre a transformação dos açúcares fermentescíveis do mosto em etanol e gás carbônico, em grandes concentrações, e outros componentes (ácidos orgânicos, ésteres, álcoois superiores e aldeídos) que são responsáveis pelas propriedades organolépticas da cachaça. Durante a destilação, onde ocorre a separação das porções voláteis e fixas, o fracionamento do destilado garante que a fração de interesse, o destilado de coração, possua concentrações adequadas dos compostos orgânicos originários da fermentação e baixa concentração de contaminantes. Após esta etapa a cachaça está pronta para o consumo, sendo comum, entre os produtores, que ela seja armazenada, para que as suas propriedades sejam melhoradas, ou envelhecida em toneis de madeira, onde adquirem coloração e odor próprios do recipiente onde foram armazenadas.

Palavras-chave: cachaça artesanal; fermentação; destilação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem de um alambique confeccionado em cobre para processos artesanais.....	15
Figura 2. Diagrama de Cobenze	22
Figura 3. Imagem de um alambique com indicação dos seus componentes	29
Figura 4. Diagrama de fases da mistura água e etanol para a destilação com refluxo	31
Figura 5. Pontos de ebulição dos componentes encontrados na cachaça.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais diferenças entre as etapas de fermentação e destilação dos processos artesanal e industrial de produção de cachaça	11
Tabela 2. Denominações possíveis para a cachaça artesanal em função do recipiente utilizado e do tempo de armazenamento	12
Tabela 3. Composição química e limites de qualidade para a cachaça	16
Tabela 4. Composição máxima dos contaminantes presentes na cachaça, de acordo com a legislação brasileira	17
Tabela 5. Volumes e teores alcóolicos típicos de uma destilação em alambique	30
Tabela 6. Principais processos para utilização do vinhoto com as vantagens e desvantagens associadas a cada método	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Pró-Álcool	Programa Nacional do Álcool

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	14
2.1 Objetivos Específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 A cana-de-açúcar	17
3.1.1 Preparo do solo.....	17
3.1.2 Cultivo da cana-de-açúcar	18
3.1.3 Época de plantio	19
3.1.4 O plantio da cana-de-açúcar	20
3.1.5 Colheita da cana-de-açúcar	20
3.2 Processamento da cana-de-açúcar	21
3.2.1 Moagem.....	21
3.2.2 Limpeza do caldo	21
3.2.3 Preparo do mosto da fermentação	22
3.3 Fermentação Alcoólica.....	23
3.3.1 Pé-de-cuba.....	23
3.3.2 O processo fermentativo	24
3.3.2.1 Fatores que influenciam a fermentação	24
3.3.2.1.1 Disponibilidade de substrato.....	24
3.3.2.1.2 Aeração	25
3.3.2.1.3 Temperatura	25
3.3.2.1.4 pH	25
3.3.2.1.5 Contaminação bacteriana	26
3.3.2.1.6 Concentração de etanol.....	26
3.3.2.2 Componentes secundários.....	26
3.3.2.3 Parâmetros de qualidade da fermentação.....	28
3.3.3 Separação do fermento	28
3.3.3.1 Aproveitamento como subproduto.....	28

3.4 Destilação	29
3.4.1 O Alambique	29
3.4.2 Fracionamento da cachaça artesanal	30
3.4.2.1 O vinhoto	32
3.4.2.1.1 Aproveitamento como subproduto	33
3.5 Armazenamento e envelhecimento	35
4. CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1. INTRODUÇÃO

A produção da cachaça artesanal, que utiliza a cana-de-açúcar como matéria-prima, foi beneficiada pelo investimento do Governo, na década de 70, para o desenvolvimento da indústria sucroalcooleira para produção de etanol (VEIGA et al, 2006; JANINI, 2007). A produção brasileira de cachaça é estimada em 2,0 bilhões de litros, sendo 80% originários de alambiques artesanais, concentrados principalmente nos estados de Minas Gerais e São Paulo (SILVA et al, 2014).

A legislação brasileira define que a cachaça é a aguardente produzida a partir da cana de açúcar no Brasil, com teor alcoólico entre 38 e 48 % em volume, a 20 °C, obtida pela destilação do mosto fermentado de cana-de-açúcar, podendo ser adicionada de açúcares, expressos em sacarose, até o limite de 6,0 g/L (BRASIL, 2005). A aguardente de cana é a bebida com teor alcoólico entre 48 e 54 °GL.

A cachaça pode ser produzida através de processos artesanal e indústria, sendo que as suas principais diferenças são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Principais diferenças entre as etapas de fermentação e destilação dos processos artesanal e industrial de produção de cachaça (FARIA, 1995; NOVAES, 2000).

FERMENTAÇÃO	ARTESANAL	INDUSTRIAL
Composição do caldo	Utiliza apenas o caldo extraído da cana-de-açúcar	Suplementado com vitaminas e minerais
Bactericidas e Antibióticos	Não	Sim
Antiespumante	Não	Sim
Correção do pH	Não	Ácidos fixos
DESTILAÇÃO		
Regime de operação	Fluxo descontínuo	Fluxo contínuo
Fracionamento do destilado	Sim	Não
Produto comercializado	Destilado de coração	Todo o destilado

No processo artesanal, durante a fermentação, etapa onde os açúcares do mosto são convertidos em etanol, água e outros componentes minoritários (ésteres, aldeídos, ácidos orgânicos e álcoois superiores), é comum que haja contaminação bacteriana devido à ausência de bactericidas e antibióticos, de forma que o controle da qualidade do processo advenha das

leveduras utilizadas na fermentação, denominadas pé-de-cuba. A qualidade do pé-de-cuba é fundamental pois, além de garantir elevada concentração e viabilidade celular, reduz os riscos de contaminação, visto que o açúcar será consumido pelas células de interesse e convertidos em etanol (OLIVEIRA et al, 2005; RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

A destilação é a operação unitária na qual os componentes voláteis (água, etanol, metanol, ácido acético, álcoois superiores, ésteres, aldeídos e gás carbônico) são separados dos não voláteis (células de leveduras, minerais e ácidos orgânicos e inorgânicos). O menor volume obtido no processo artesanal é resultado do fracionamento do destilado, que garante uma melhor composição química, com menor concentração de contaminantes (BOSQUEIRO, 2010; OLIVEIRA et al, 2005; RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

Após a destilação, a cachaça está pronta para o consumo, porém, suas características sensoriais podem ser melhoradas caso seja submetida às etapas de armazenamento (atua na suavização do sabor) e envelhecimento (confere características peculiares associadas ao tipo de madeira utilizada no tonel) (MAIA e CAMPELO, 2006; BOSQUEIRO, 2010). A tabela 2 apresenta as possíveis denominações da cachaça em função dos tratamentos na pós-destilação.

Tabela 2. Denominações possíveis para a cachaça artesanal em função do recipiente utilizado e do tempo de armazenamento (MAIA e CAMPELO, 2006).

RECIPIENTE	TEMPO	COMPOSIÇÃO DO PRODUTO FINAL (%)	DENOMINAÇÃO
Neutro	-----	-----	Branca
Barris de madeira	Mínimo de um ano	50,0	Envelhecida
		100,0	<i>Premium</i>
	Mínimo de três anos	100,0	Extra <i>Premium</i>

As denominações envelhecida, *premium* e *extra premium* são conferidas apenas às cachaças cujo tonel de armazenamento possua volume inferior a 600 L e seja lacrado por um fiscal autorizado do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (MAIA e CAMPELO, 2006; BOSQUEIRO, 2010).

Além das denominações apresentadas, existe uma outra classe de cachaça artesanal, indiferente quanto ao ambiente e tempo de armazenamento: a cachaça adoçada. Essa denominação deve ser adotada caso o teor açúcares, expresso em sacarose, seja superior ao previsto na legislação e esteja no intervalo de 6 a 30 g/L (MAIA e CAMPELO, 2006; BOSQUEIRO, 2010).

Durante as etapas de produção da cachaça artesanal, ocorre a geração dos resíduos (MAIA e CAMPELO, 2006):

- Palha e ponta da cana, durante a colheita no canavial;
- Bagaço, durante a moagem;
- Leveduras na fermentação e;
- As frações da destilação que não são utilizadas, cabeça e cauda, além da vinhaça.

Durante anos, o gerenciamento destes resíduos não foi prioridade dos produtores, sendo que os mesmos eram descartados da forma que fosse mais conveniente e gerasse menos custos. Entretanto, com o enrijecimento das legislações ambientais, o manejo destes resíduos passou a ocupar um papel de destaque no planejamento estratégico destas empresas (LAIME et al, 2011; RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

Em paralelo ao destaque das questões ambientais, surgiram diversos estudos cujo objetivo referia-se à melhoria das condições do meio ambiente e/ou gerenciamento dos resíduos industriais, de forma que pudessem ser descartados de maneira correta. Não apenas o meio ambiente, mas diversas outras questões favoreceram o desenvolvimento da biotecnologia, a qual consiste no uso de micro-organismos, ou suas partes, para a produção de bens ou serviços. A partir de demandas mais complexas, veio a Engenharia de Bioprocessos para apresentar soluções industriais, fazendo uso da biotecnologia e beneficiando diversos setores, tradicionais ou não.

2. OBJETIVO

Compreender o processo de produção da Cachaça Artesanal sob a ótica do Engenheiro de Bioprocessos.

2.1. Objetivos Específicos

- ❖ Entender os requisitos de implantação do canavial, as necessidades nutricionais da cana-de-açúcar e os parâmetros a serem avaliados antes da colheita.
- ❖ Avaliar os parâmetros que afetam a qualidade da fermentação e elucidar quais medidas podem ser tomadas a fim de maximizar a eficiência desta etapa.
- ❖ Estudar o processo de destilação e as transformações que nele ocorrem de forma a facilitar a manipulação das variáveis que afetam a qualidade final da cachaça.
- ❖ Determinar a importância do armazenamento/envelhecimento e os seus efeitos sobre as propriedades organolépticas da cachaça.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A cachaça é o terceiro destilado mais consumido no mundo e foi caracterizada como Bebida Brasileira, via Decreto Nacional, e Patrimônio Cultural do Estado de Minas Gerais através de Lei Estadual. Estima-se que a produção brasileira de cachaça artesanal seja de 1,8 bilhões de litros (ABRABE, 2015; SILVA et al, 2014).

O processo artesanal utiliza alambiques confeccionado em cobre, ou aço inox, que operam em regime descontínuo, de forma que o destilado possa ser fracionado em cabeça, coração e cauda, a partir das análises da temperatura do processo e do teor alcoólico (°GL) do destilado (BOSQUEIRO, 2010; MAIA e CAMPELO, 2005; NOVAES, 2000).

A Figura 1 apresenta a imagem de um alambique utilizado em processos artesanais.

Figura 1. Imagem de um alambique confeccionado em cobre para processos artesanais.



Diferente do que ocorre na produção da cachaça artesanal, em plantas industriais esta etapa é conduzida em colunas de destilação contínua, sendo o vinho adicionado no destilador, sendo os vapores recolhidos ao final do período de destilação. O destilado é o produto final do processo (NOVAES, 2000).

A cachaça recém-destilada apresenta sabor intenso e seco, tornando-a de difícil degustação. A partir deste ponto, nenhum outro procedimento é necessário. Entretanto, grande parte dos produtores reserva uma porção da cachaça para que seja envelhecida em barris de madeira, permitindo que ocorram reações químicas que resultem em compostos secundários (álcoois superiores, ésteres, aldeídos e outros) responsáveis pela melhoria nas características sensoriais da mesma. Dentre os fatores que afetam a qualidade final do produto, tem-se:

- A higienização e manutenção dos equipamentos e utensílios, o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), além da existência de manuais e instruções de trabalho;
- A qualidade das matérias-primas utilizadas.

A água é o componente utilizado em todas as etapas do processo, desde a diluição do caldo da fermentação até a limpeza dos equipamentos, sendo sua qualidade fundamental ao processo. Quanto à cana, a qualidade começa na escolha das mudas, passando pela nutrição adequada e também pelo método de colheita. Quanto aos equipamentos, a limpeza e manutenção correta e constante são importantes para evitar a contaminação do produto durante o processo. (PINHEIRO et al, 2003; OLIVEIRA et al, 2005).

A regulamentação nacional da cachaça é de competência do MAPA, que estabelece os padrões químicos quantitativos para os componentes e contaminantes da cachaça, com o objetivo de regular e garantir a segurança do consumidor. A tabela 3 apresenta a composição química e os respectivos limites permitidos na cachaça, e a tabela 4 elenca as concentrações máximas dos contaminantes (BRASIL, 2005)

Tabela 3. Composição química e limites de qualidade para a cachaça (BRASIL, 2005).

COMPONENTE	UNIDADE	LIMITE	
		Mínimo	Máximo
Acidez volátil (em ácido acético)	mg / 100 mL etanol	-----	150
Ésteres (em acetato de etila)	mg / 100 mL etanol	-----	200
Aldeídos (em aldeído acético)	mg / 100 mL etanol	-----	30
Furfural + Hidroximetilfurfural	mg / 100 mL etanol	-----	5
Álcoois superiores ¹	mg / 100 mL etanol	-----	360
Congêneres ²	mg / 100 mL etanol	200	650
Açúcares ³	g / L	-----	30,0

¹ Soma dos álcoois isobutílico, isoamílico e n-propílico.

² Soma da acidez volátil, aldeídos, ésteres totais, furfural + hidroximetilfurfural e álcoois superiores.

³ Para valores superiores a 6 g/L deve indicar, no rótulo da cachaça, que ela é adoçada.

Tabela 4. Composição máxima dos contaminantes presentes na cachaça, de acordo com a legislação brasileira (BRASIL, 2005).

COMPONENTE	UNIDADE	LIMITE MÁXIMO
Álcool metílico	mg / 100 mL etanol	20
Carbamato de etila	µg / L de cachaça	150
Acroleína (2-propenal)	mg / 100 mL etanol	5
Álcool sec-butílico (2-butanol)	mg / 100 mL etanol	10
Álcool n-butílico (1-butanol)	mg / 100 mL etanol	3
Cobre	mg / L de cachaça	5
Chumbo	µg / L de cachaça	200
Arsênio	µg / L de cachaça	100

3.1. A cana-de-açúcar

3.1.1. Preparo do solo

O preparo do solo tem por objetivo eliminar, ou minimizar, as condições adversas para o crescimento da cana, por exemplo, a presença de pragas, o excesso de alumínio, a baixa disponibilidade de nutrientes e a remoção da soqueira da safra anterior, com o objetivo de maximizar a produtividade econômica do canavial. Nesse sentido, deve-se considerar a variedade escolhida para o plantio e as suas particularidades (VITTI et al, 2005).

A produtividade agrícola expressa a quantidade de cana, em toneladas, numa área determinada, expressa em hectares. Os fatores que afetam esse parâmetro são: (i) o solo, tendo em vista que é a base do cultivo e, portanto, deve apresentar todas as condições físicas, químicas e biológicas adequadas para o crescimento da cana; (ii) o clima, que infere nas condições de umidade, exposição à luz solar (temperatura e luminosidade); (iii) a variedade da cana, cujas condições ótimas para o crescimento devem ser conhecidas. Juntos, esses três fatores determinam a produtividade e, somados a estes, tem-se ainda a prevenção ao surgimento de pragas (nematoides e cupins, por exemplo), plantas invasoras e doenças como a ferrugem. Nesse sentido, a nutrição adequada da cana é, na maioria dos casos, um método eficiente para evitar doenças. (VITTI et al, 2005)

Os processos mais comumente utilizados no preparo do solo são a adubação e a calagem. A necessidade da planta é um fator intrínseco de cada variedade, de forma que o tipo

de solo pode influenciar, positiva ou negativamente, nos custos de correção do mesmo. O estoque nutricional do solo está diretamente relacionado às práticas anteriores. A eficiência do fertilizante quantifica as perdas ocorridas entre a aplicação do mesmo e a sua absorção pela planta, sendo que diversos fatores podem reduzir essa eficiência, dentre eles: a erosão, geralmente associada ao nitrogênio, fósforo e potássio; a lixiviação, com a perda de nitratos e potássio devido à percolação no solo; a fixação dos nutrientes devido à precipitação de fosfatos com alumínio ou ferro; a volatilização no nitrogênio presente na ureia, ocorrendo principalmente quando ocorre a aplicação sobre a palha da cana; a desnitrificação, que consiste na redução dos nitratos quando na presença de umidade excessiva; além da volatilização do enxofre e do nitrogênio devido à queima do canavial (VITTI e MAZZA, 2002; ROSSETTO et al, 2004; LUZ et al, 2005; VITTI et al, 2005).

Uma alternativa eficiente ao uso de fertilizantes é a adubação verde, que consiste no plantio de outra cultura, usualmente uma leguminosa, no período após a última colheita e anteriormente ao plantio da cana-soca. O maior benefício associado à prática é a elevada fixação de nitrogênio, devido à associação simbiótica com bactérias do gênero *Rhizobium* nas raízes. Outro benefício desta prática é a rotação de culturas, que contribui para a recuperação do solo, evitando a exaustão do mesmo pelo plantio consecutivo e longínquo de uma mesma planta. Tal prática é especialmente indicada àqueles que utilizam variedades de ano e meio, uma vez que a adubação verde pode ocorrer no período entre a última colheita (novembro) e o plantio da próxima cultura (março). Outros benefícios associados à prática são: aumento do teor de matéria orgânica e concentração de nitrogênio e a redução das populações de cupins e nematoides. (EMBRAPA, 2001; LUZ et al, 2005).

A calagem, que consiste na aplicação de calcário no solo, tem por objetivo a correção da acidez, a neutralização do alumínio e do manganês, o aumento da disponibilidade de cálcio, fósforo e manganês, além de melhorar a estrutura do solo e propiciar a atividade microbiana. Associado à correção do pH existe ainda a redução da lixiviação do potássio, reduzindo a necessidade de aplicação do mesmo através de fertilizantes (LUZ et al, 2005).

3.1.2. Cultivo da cana-de-açúcar

Nas diversas atividades industriais, cujo objetivo é o lucro, os parâmetros operacionais estão sujeitos a ajustes e modificações, sejam elas no planejamento, no controle ou na execução dos processos, com o objetivo de aumentar a produtividade, considerando as

demandas técnicas e econômicas. Assim, nem sempre os processos alcançarão os máximos de produtividade (PEIXOTO et al, 1988).

No que diz respeito à cana-de-açúcar, diversos são os fatores que afetam a produtividade agrícola, a saber: (i) densidade do plantio, espaçamento adequado dos sulcos; (ii) qualidade da muda; (iii) clima da região; (iv) condições físicas, químicas e biológicas do solo; (v) disponibilidade de água; (vi) nutrição adequada da planta e (vii) controle de pragas (SIMÕES NETO, 1986; PEIXOTO et al, 1988). Dessa forma, o planejamento do ciclo de vida da cana-de-açúcar é fundamental para a determinação de sua viabilidade, uma vez que deve analisar todos os custos envolvidos (aquisição e manutenção de equipamentos, pessoal, implantação e manutenção do canavial, insumos e o valor do produto final) (VITTI e MAZZA, 2002).

3.1.3. Época de plantio

As diversas variedades de cana existentes no mercado apresentam diferentes tempos de desenvolvimento, de forma que a escolha da variedade deve ser feita de forma criteriosa, uma vez que existem vantagens e limitações associadas a cada uma delas. Essa distinção é feita apenas no primeiro estágio de desenvolvimento da cana, denominado de cana-planta. Após o primeiro corte inicia-se o período denominado cana-soca, com duração de doze meses para todas as variedades. Dois fatores são cruciais e determinantes para o sucesso do canavial, independentemente do tipo de muda: disponibilidade de umidade e temperaturas superiores a 20° C (VITTI e MAZZA, 2002; CONAB, 2014).

A cana de ano e meio tem seu período de crescimento estimado entre 13 e 20 meses, podendo ainda ser classificada em precoces, médias ou tardias. Atrelado ao longo período de desenvolvimento, estas variedades são mais adaptáveis a solos menos férteis, uma vez que dispõe de maior tempo para crescerem. O plantio ocorre, normalmente, entre os meses de janeiro e março (VITTI e MAZZA, 2002).

A cana de ano, devido ao menor tempo de desenvolvimento requerido, é normalmente plantada entre maio e agosto, quando há segurança sobre a disponibilidade de água. A principal vantagem destas variedades frente às demais é o tempo reduzido de utilização do solo, cujo término, usualmente em novembro, coincide com o período de chuva, propiciando um desenvolvimento ótimo da planta e reduzindo os riscos de erosão (VITTI e MAZZA, 2002).

3.1.4. O plantio da cana-de-açúcar

O preparo do solo consiste na adequação do mesmo para o recebimento das mudas de cana e compreende as correções físico-químicas (pH, acidez, eliminação de contaminantes) análises microbiológicas. A sulcação deve ser feita de forma a comportar as mudas e propiciar condições adequadas de umidade. Em relação à distribuição de gemas, a falta delas compromete o canavial por um período de até seis anos e o seu excesso pode gerar sobrecargas no solo, gerando aumentos excessivos nos custos de manutenção do canavial (VITTI e MAZZA, 2002; BEAUCLAIR e SCARPARI, 2006; CONAB, 2014).

3.1.5. Colheita da cana-de-açúcar

A colheita pode ser feita tanto de maneira mecânica quanto manualmente. Usualmente, devido ao desenvolvimento único de cada indivíduo, a colheita é feita de forma manual, de forma que o desponte e a remoção da palha sejam feitos da forma mais precisa possível e a perda de matéria-prima seja mínima. Existem sistemas onde a cana é picada no próprio canavial, através de um sistema na própria carreta de transporte. (MAIA e CAMPELO, 2005).

O parâmetro utilizado para determinação da colheita da cana é o Índice de Maturação (IM), parâmetro obtido no próprio canavial, que avalia o Brix (quantificação dos sólidos solúveis existentes) das extremidades da cana. O Índice de Maturação considera tanto o valor do Brix da ponta quanto da base da cana, permitindo avaliar a distribuição de sacarose ao longo de toda sua extensão. Os valores de referência utilizados são (PECEGE, 2012):

- ❖ $IM < 0,60$: cana verde ou em desenvolvimento;
- ❖ $0,60 < IM < 0,85$: cana em maturação;
- ❖ $0,85 < IM < 1,00$: cana madura;
- ❖ $IM > 1,00$: cana em processo de redução da concentração de sacarose.

Dá-se preferência para a colheita da cana madura, mas uma vez que o canavial tem o seu plantio iniciado na mesma época, é usual que, durante o período de safra haja a colheita de canas ainda em processo de maturação e também em redução de sacarose. Além de avaliar a maturação da cana, outro fator intrínseco à colheita é a produção estimada de cachaça, de forma que a produtividade agrícola do canavial, em toneladas por hectare, é o valor de referência para a determinação da área a ser colhida (PECEGE, 2012).

3.2. Processamento da cana-de-açúcar

3.2.1. Moagem

Indica-se que a cana seja colhida no mesmo dia em que será realizada a moagem e, caso seja necessário aguardar um intervalo de tempo, a matéria prima deve ser armazenada na sombra, uma vez que a exposição à luz e ao calor favorecem a proliferação de bactérias, resultando no aumento da viscosidade do caldo e reduzindo o rendimento da fermentação. A operação de moagem é fundamental na eficiência global do processo e os seus parâmetros devem sofrer constantes revisões, uma vez que perdas nesta etapa influem negativamente o restante do processo (MAIA e CAMPELO, 2005).

Existem várias geometrias disponíveis para as moendas utilizadas em alambiques, mas as comumente utilizadas são as simples com um terno de rolos, cuja extração estimada entre 60% e 70% (L de caldo/ton de cana), aceitável quando analisada sob a ótica da moagem a seco (a redução do caldo aumenta o teor de fibras e, conseqüentemente, dificulta a extração). Para maiores rendimentos, entretanto, pode-se aplicar água sobre o bagaço de forma que a sacarose remanescente seja extraída numa segunda moagem, o que pode elevar os níveis de extração a 90%. Dentre os fatores críticos ao processo tem-se a qualidade da água utilizada e a logística do processo, uma vez que o desvio da linha de processamento para a segunda moenda pode gerar perdas de tempo (MAIA e CAMPELO, 2005).

3.2.2. Limpeza do caldo

Após a extração, o caldo de cana deve passar por processos de limpeza e remoção de componentes indesejados. Os processos industriais utilizam, normalmente, agentes químicos associados às operações de filtração e decantação nesta etapa. Em destilarias artesanais, entretanto, a limpeza inicia-se com a passagem do caldo por filtros de náilon, ou plásticos de alta resistência, com malhas de 1 mm que retêm os resíduos do bagaço e outras partículas sólidas. Em seguida, tem-se um decantador no qual as partículas remanescentes no caldo deslocam-se para o fundo (MAIA e CAMPELO, 2005).

Dentre os parâmetros observados, o tempo de residência deve ser de aproximadamente 20 minutos, evitando a proliferação de micro-organismos contaminantes no caldo, e a velocidade máxima do caldo deve ser inferior à velocidade de decantação, possibilitando a

remoção das partículas suspensas. Quando bem projetados os decantadores podem reter até 99,9% das impurezas, resultando em um caldo límpido (MAIA e CAMPELO, 2005).

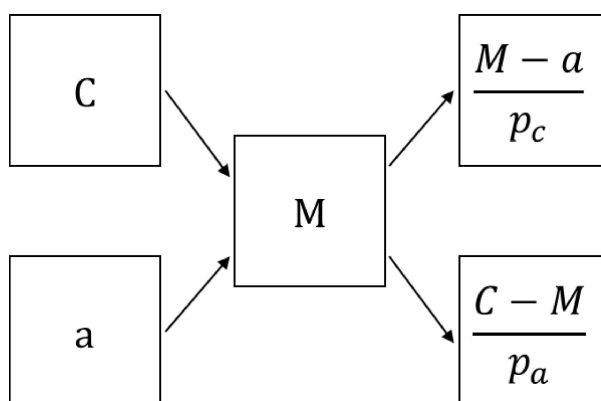
A análise desta etapa é de suma importância para a indústria devido à três fatores principais: (i) a clarificação do caldo é essencial para a garantia da qualidade das próximas etapas; (ii) o processo deve acontecer no menor tempo possível, pois as moendas funcionam em fluxo contínuo e as dornas de fermentação devem ser alimentadas com frequência; e (iii) a etapa não deve representar gastos excessivos, uma vez que, quando comparada com a fermentação e destilação, por exemplo, pode ser considerada mais simples.

3.2.3. Preparo do mosto de fermentação

Após a obtenção do caldo, livre de impurezas sólidas, este ainda deve passar por uma etapa de diluição antes de ser usado na fermentação. Adiciona-se água potável, isenta de cloro, reduzindo a concentração para a faixa de 14 – 16 °Brix. Faz-se necessário, então, o uso de dornas volantes, uma vez que, caso a diluição do caldo ocorresse na presença das leveduras, estas estariam sujeitas aos efeitos do choque osmótico, que pode reduzir a produtividade do processo. As dornas devem ser fabricadas em aço inox, com geometria cilíndrica e fundo cônico (MAIA e CAMPELO, 2005).

O cálculo da quantidade de água a ser adicionada para a correta diluição do caldo de cana-de-açúcar é realizado pelo Diagrama de Cobenze, apresentado na Figura 2, no qual C corresponde ao Brix do caldo de cana; a corresponde ao Brix da água; M corresponde ao Brix do mosto (desejado); $(M - a)/p_c$ corresponde ao volume de caldo a ser usado na diluição; $(C - M)/p_a$ corresponde ao volume de água que será adicionado ao caldo, onde p_c e p_a são as densidades do caldo e da água, respectivamente.

Figura 2. Diagrama de Cobenze (Adaptado de MAIA e CAMPELO, 2005).



3.3. Fermentação Alcoólica

A fermentação é o processo onde os açúcares presentes no caldo de cana-de-açúcar é convertida em etanol e outros componentes importantes para as peculiaridades organolépticas da cachaça. As leveduras utilizadas são, usualmente, linhagens de *Saccharomyces cerevisiae* e, em alambiques que utilizam o fermento caipira (obtido a partir de leveduras encontrados no próprio caldo), a variedade de cepas encontradas pode ser enorme. Já na utilização de cepas selecionadas, como às de panificação, a linhagem tende a predominar no caldo durante todas as fermentações (SCHAWN et al, 2001).

3.3.1. Pé-de-cuba

Conforme citado anteriormente, as leveduras utilizadas na fermentação alcoólica são preservadas na porção inferior das dornas durante vários processos. O preparo é realizado em dornas volantes, normalmente localizadas no mesmo ambiente da diluição do caldo. A etapa de propagação das leveduras tem como objetivo a multiplicação dos micro-organismos até uma quantidade adequada para que a sua população seja grande o suficiente para iniciar a fermentação (há também o fato de que uma grande população tende a impedir que espécies contaminantes dominem o meio de cultivo) (PATARO et al, 2002).

A forma mais comum de preparo do inóculo consiste no uso do próprio caldo de cana, onde já existe uma população de leveduras. Este caldo é transferido para uma dorna volante e, em condições controladas de temperatura e aeração, adiciona-se caldo diariamente durante um período de cinco a sete dias. Após este período de tempo as leveduras são transferidas para as dornas de fermentação, onde permanecem por até 30 dias, dependendo das análises realizadas na cachaça, principalmente no que diz respeito à quantidade de componentes indesejados. (SCHAWN et al, 2001; RIBEIRO, 2002) A principal vantagem deste tipo de inóculo é o fato de as leveduras estarem adaptadas às condições técnicas regionais, o que pode resultar num melhor desempenho das mesmas no processo fermentativo. (RIBEIRO e RIBEIRO, 2014)

Há a possibilidade de usar cepas selecionadas, cujas vantagens estão associadas à maior produtividade e melhoria das características sensoriais da cachaça. O preparo é semelhante ao do fermento caipira, com a vantagem de que o tempo necessário varia de dois a três dias. Deve-se dar atenção ao fato de que nem sempre as leveduras se adaptarão às condições do alambique, podendo ter sua eficiência reduzida. (PATARO et al, 2002)

3.3.2. O processo fermentativo

Diferente da etapa de preparo do fermento, que ocorre na presença de oxigênio e cujo objetivo é a multiplicação das leveduras, na fermentação o produto de interesse é o etanol, resultado do metabolismo anaeróbico da *Saccharomyces*, que decompõe a sacarose do mosto em D-glicose e D-frutose e, posteriormente, são utilizadas como substrato para a produção de etanol e gás carbônico, em maiores quantidades, e ésteres, aldeídos e álcoois superiores em menores concentrações (JERONIMO et al, 2008).

A maioria das fermentações para produção de cachaça artesanal ocorre no modelo batelada alimentada, onde o caldo diluído é adicionado gradativamente à dorna; o modelo se mostrou o mais eficiente neste processo, uma vez que diminui tanto o estresse sobre as células assim como as possibilidades de contaminação, dado que as leveduras do pé-de-cuba consumirão o substrato disponível rapidamente (MAIA e CAMPELO, 2005).

3.3.2.1. Fatores que influenciam a fermentação

A compreensão dos fatores que afetam a qualidade da fermentação e a otimização das condições operacionais tem por objetivo evitar que as leveduras sejam submetidas a situações de estresses, o que pode acarretar na produção de um vinho de baixa qualidade e/ou também na necessidade de troca do pé-de-cuba. Aspecto importante decorrente destas análises é que, com o passar do tempo, as leveduras menos adaptadas às condições locais terão sua população reduzida em função daquelas que melhor se adequaram e, assim, espera-se melhores resultados nesta etapa (MAIA e CAMPELO, 2005; SOUZA, 2009; LIN et al, 2012).

3.3.2.1.1. Disponibilidade de substrato

O principal fator relacionado à necessidade de diluição do caldo é a osmotolerância limitada das células que, em elevadas concentrações de açúcar, reduzem a capacidade de transporte do mesmo e, conseqüentemente, diminuem a produtividade em etanol. Inicialmente as células sofrem uma perda osmótica excessiva de água para o citosol, provocando mudanças na estrutura celular e alterações em seu metabolismo. Estudos sobre o efeito da concentração inicial de substrato sobre a produtividade em etanol indicam que, nas primeiras 24 horas, concentrações entre 20 – 300 kg m⁻³ apresentam efeitos semelhantes sobre a produtividade. Para períodos mais elevados a produção de etanol é inibida (SOUZA, 2009; LIN et al, 2012).

3.3.2.1.2. Aeração

A análise do metabolismo das células de *Saccharomyces* mostra que a produção de etanol é favorecida em condições de anaerobiose, principalmente nas células que não se encontram na fase estacionária do crescimento. Estudos indicam, entretanto, que rendimentos elevados de etanol são obtidos em condições microaeróbias, que ocorrem em concentrações de oxigênio próximas de zero (ALFENORE et al, 2004).

Dentre os fatores que podem influenciar esta variável, pode-se citar o volume da dorna de fermentação e o volume útil do processo; é comum que seja utilizado 90% do volume da dorna, sendo que os 10% restantes são destinados à acomodação da espuma gerada no processo e também para a preservação do “colchão de CO₂”, termo que se refere ao gás carbônico gerado na fermentação e que forma uma barreira na superfície do caldo, diminuindo a taxa de transferência de oxigênio da atmosfera para o processo e, assim, preservando as características anaeróbias da etapa (RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

3.3.2.1.3. Temperatura

A temperatura afeta as reações bioquímicas e, portanto, o desempenho das leveduras. A faixa utilizada nos alambiques varia entre 25 e 35 °C, dependendo das condições locais e da existência de instrumentos de aquecimento nas dornas de fermentação, além das características fisiológicas da célula. Em condições elevadas de temperatura a *Saccharomyces* reduz a sua tolerância à presença de etanol e favorece a formação de metabólitos como o glicerol. Outro fator a ser considerado quanto à temperatura é a presença de bactérias contaminantes, que podem ser favorecidas em regiões com temperaturas elevadas (SOUZA, 2009). Temperaturas superiores a 30 °C favorecem menores produções de etanol. Entretanto, a recuperação deste componente é facilitada (LALUCE et al., 1991; LINDQUIST, 1992).

3.3.2.1.4. pH

O pH é importante devido à sua influência sobre a produção de etanol, o crescimento das leveduras e controle de contaminação bacteriana. Sabe-se que as leveduras apresentam uma boa capacidade homeostática interna, de forma que o seu pH é mantido entre 5,8 e 6,9 para valores extracelulares na faixa de 2 – 7. Portanto, as fermentação ocorrem com pHs entre 4,0 e 5,5 (SOUZA, 2009).

3.3.2.1.5. Contaminação bacteriana

Da mesma forma que o fermento caipira é desenvolvido a partir de leveduras encontradas no próprio caldo da cana, o mesmo apresenta também uma diversidade de bactérias que, devido às condições de preparo do fermento, favoráveis às *Saccharomyces*, encontram-se em pequenas quantidades durante a fermentação. Além de competir com as leveduras, que dominam o meio, pelo substrato, as bactérias contaminantes encontram ainda condições extremamente hostis para o seu desenvolvimento: elevada concentração de etanol e alta acidez do mosto. A presença de outros organismos não é o maior problema do processo, mas sim os componentes que são produzidos e são incorporados ao produto final, que podem reduzir a qualidade do mesmo e, conseqüentemente, o seu valor de mercado (SOUZA, 2009).

3.3.2.1.6. Concentração de etanol

A presença de etanol no meio pode afetar negativamente a sua produtividade, já que atua como modulador negativo para a via glicolítica, inibindo algumas vias de transporte, de sinalização e até mesmo enzimas deste metabolismo. Estudos mostram que concentrações de etanol inferiores a 26 g L^{-1} não tem efeito sobre as células, mas quando estes valores ultrapassam 65 g L^{-1} o crescimento celular é completamente inibido (SOUZA, 2009).

3.3.2.2. Produção de componentes secundários

Durante o processo fermentativo, mesmo quando não há contaminação, componentes secundários (butanol, isobutanol, acetato de etila - benéficos ao sabor - e ácido acético, propanol, acetaldeído – indesejados) são formados pelo metabolismo das leveduras, ou outros micro-organismos presentes no mosto, sendo, portanto, responsáveis por parte das propriedades organolépticas da cachaça, juntamente com àquelas adquiridas na etapa de envelhecimento, quando a cachaça é armazenada em toneis de madeira ou aço inox (BOSQUEIRO, 2010).

A quantidade e a diversidade dos compostos secundários dependem de diversos fatores, entre os quais: características intrínsecas ao mosto da fermentação, a linhagem escolhida de *Saccharomyces*, a presença de outros micro-organismos no processo, do tipo de destilador utilizado, do fracionamento na destilação, da higienização do equipamento, entre

outros. A origem desses componentes é a fermentação, sendo que aos ésteres e aos aldeídos são atribuídas as características olfativa e gustativa da cachaça (BOSQUEIRO, 2010).

O acetaldeído é o principal aldeído formado durante a fermentação e o seu aparecimento ocorre, normalmente, no início da fermentação, uma vez que ao longo do processo estes componentes são oxidados e produzem o ácido acético; um dos fatores que favorece o surgimento destes compostos é a oxigenação do mosto. Durante a destilação, estes componentes localizam-se na fração inicial, junto com os ésteres, por exemplo, que são componentes que contribuem para as características da cachaça; a alternativa para reduzir os efeitos dos aldeídos é a microaeração da cachaça após o seu armazenamento. O furfural e o hidroximetilfurfural tem sua formação associada à práticas contrárias às indicadas para operação de indústrias do setor sucroalcooleiro: queima do canavial, destilação com o vinho contendo concentrações residuais de açúcar ou bagaço. A presença destes componentes é indesejada pois os mesmos conferem aroma enjoativo e penetrante à cachaça (MAIA e CAMPELO, 2005; BOSQUEIRO, 2010).

Os ácidos orgânicos, avaliados pela acidez total, são representados pelo ácido acético, e a sua origem pode estar relacionada tanto à contaminação por bactérias acéticas quanto pelo metabolismo das próprias leveduras, que secretam esse composto durante a transição do metabolismo aeróbio e anaeróbio. O excesso de ácidos não é benéfico à cachaça, pois confere características fortes. No entanto, sua presença é indispensável pois, durante o envelhecimento, reagem com os álcoois e produzem ésteres, que caracterizam o aroma da bebida (BOSQUEIRO, 2010).

A formação de álcoois superiores ocorre tanto em função da degradação de aminoácidos quanto do metabolismo da *Saccharomyces*, sendo que cada linhagem apresenta características próprias quanto a produção destes compostos. Dentre os fatores responsáveis pela produção dos álcoois superiores pode-se citar a aeração excessiva durante a fermentação, as elevadas temperaturas do processo e também o pH próximo a 3, que pode aumentar em até 80% a geração dos mesmos (MAIA e CAMPELO, 2005; BOSQUEIRO, 2010).

A produção de ésteres depende não apenas das características da fermentação mas também da linhagem de *Saccharomyces*, de forma que a sua presença pode ser utilizada para a identificação da origem da cachaça. Já o metanol, componente tóxico ao organismo humano, é indesejado na cachaça, mesmo em pequenas concentrações, tendo em vista que pode causar cegueira, acidose grave e até a morte (MAIA e CAMPELO, 2005; BOSQUEIRO, 2010).

3.3.2.3. Parâmetros de qualidade da fermentação

Durante a fermentação existem alguns parâmetros que podem ser avaliados a fim de se verificar a eficiência e adequação do processo: o grau Brix do caldo não deve ultrapassar o valor de 6, considerando-se a batelada alimentada. Passadas entre 14 e 18 horas, espera-se que o valor do Brix seja igual a zero, ou seja, todo o açúcar foi consumido e a fermentação chegou ao final. O odor na sala de fermentação deve ser agradável e frutal. Quaisquer diferenças no odor, tais como a percepção de notas ácida, acética, pútrida ou sulfídrica são indicativos de contaminação bacteriana. A acidez do mosto, ao final da fermentação, não deve ser maior do que o dobro do valor inicial (para fins de qualidade, adota-se como limite 500 mg/100 mL); e o aparecimento de drosófilas indica a produção excessiva de ácido acético (MAIA e CAMPELO, 2005).

3.3.3. Separação do fermento

Após a fermentação é necessário aguardar que as células sedimentem, formando duas fases: a superior, que corresponde ao vinho isento de fermento, e a inferior, com grande concentração de leveduras e denominada pé-de-cuba. O pH do mosto é o parâmetro de maior influência na velocidade de sedimentação, uma vez que pode ser benéfico, promovendo a floculação das células, ou maléfico, quando provoca repulsão entre as mesmas. O arraste de leveduras para a destilação compromete a qualidade das fermentações posteriores (serão mais lentas) e pode prejudicar a qualidade da cachaça devido ao extravasamento do conteúdo intracelular das leveduras. Além disso, o contato por tempo prolongado com o vinho tem efeito negativo sobre as leveduras e favorece a proliferação bacteriana (MAIA e CAMPELO, 2005).

3.3.3.1. Aproveitamento como subproduto

As leveduras são removidas do processo quando o produto da destilação apresenta acidez próxima ao limite estabelecido pela legislação. Devido à sua composição, rica em sais minerais, vitaminas e proteínas (49 g de carbono/100 g de levedura), este resíduo apresenta elevado potencial para aplicação na indústria de ração animal. Cada 1 kg de levedura seca corresponde a 3 kg de milho, em valor proteico. Utilizar as leveduras, na composição da ração animal, até o limite de 35% (CORTEZ et al, 1992; MAIA e CAMPELO, 2005)

3.4. Destilação

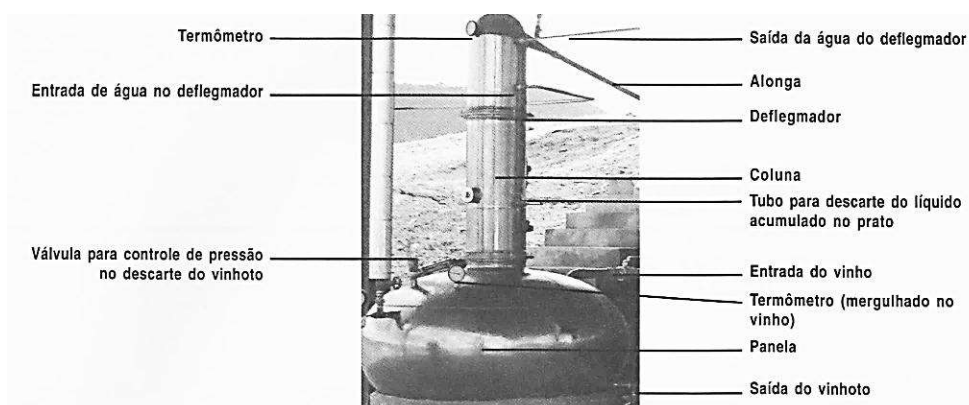
A destilação, etapa final do processo de produção da cachaça, consiste na volatilização dos componentes do vinho, obtido na fermentação, e na concentração e purificação do etanol, através da separação dos voláteis (o próprio etanol, a água, álcoois superiores, ésteres, aldeídos e gás carbônico) dos não-voláteis, ou fixos: sólidos solubilizados no mosto, minerais e células remanescentes de leveduras (BOSQUEIRO, 2010).

O alambique é fabricado, usualmente, em cobre ou aço inox específico para a produção da cachaça. A temperatura, a pressão, a graduação alcóolica do destilado são os parâmetros que devem ser monitorados durante o processo, uma vez que influenciam diretamente a qualidade das três frações obtidas: cabeça (de elevado teor alcóolico, é obtido no início do processo), coração (é a fração desejada, e corresponde ao maior volume das três frações) e cauda (de baixo teor alcóolico e obtida ao final do processo), de composições diferentes (BOSQUEIRO, 2010).

3.4.1. O Alambique

Apesar de poder apresentar diversas conformações distintas, os seguintes componentes estão sempre presentes no equipamento: a panela, onde o vinho é aquecido; a coluna de destilação, localizada acima da panela e para onde o fluxo de vapor é direcionado; e a alonga, onde os vapores são resfriados e direcionados à parte inferior onde, no estado líquido, são recolhidos, conforme apresentado na Figura 3. Pode-se inserir um trocador de calor na alonga a fim de aumentar a eficiência da condensação dos vapores (MAIA e CAMPELO, 2005).

Figura 3. Imagem de um alambique com indicação dos seus componentes (MAIA e CAMPELO, 2005).



A geometria da coluna para os alambiques de cachaça é, usualmente, cilíndrica, que dispõe de um deflegmador e pratos internos corretamente dimensionados. O aquecimento pode ser realizado de suas maneiras: fogo direto, utilizando o bagaço da cana como combustível, e através de vapor aquecido proveniente da caldeira, que é mais vantajoso devido às melhores condições de padronização da operação. Quanto ao tempo da destilação, este é definido no intervalo de 150 a 160 minutos, independente do volume de trabalho, de forma que o volume de trabalho é controlado (MAIA e CAMPELO, 2005).

3.4.2. Fracionamento da cachaça artesanal

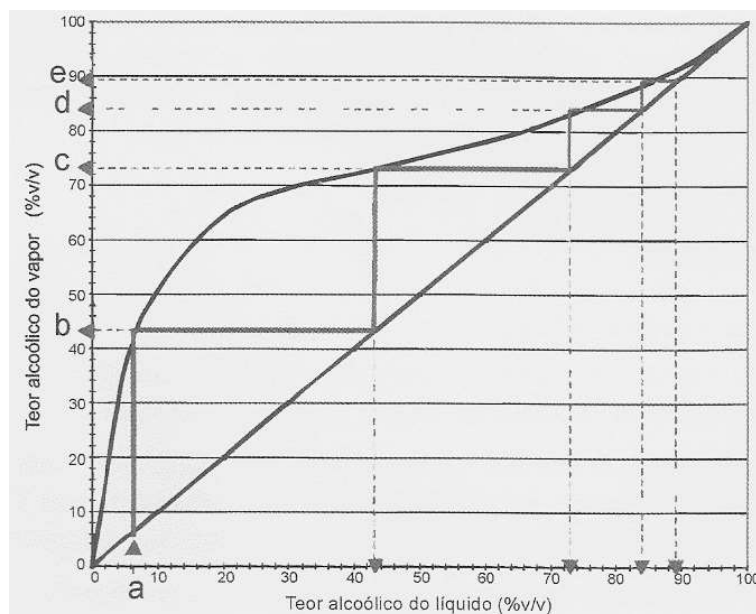
A determinação do ponto de corte para as diferentes frações da cachaça é uma medida empírica e exclusiva de cada operação, uma vez que esta etapa tem como objetivo garantir a qualidade sensorial da cachaça. Entretanto, como valores de referência, estima-se que a primeira fração, ou cabeça, corresponda a 0,7 – 1,0 % do volume do vinho; o coração representa aproximadamente 17 %; a cauda 2 % e os 80 % restantes correspondem ao vinhoto. A tabela 5 apresenta um resumo sobre as frações e os seus respectivos volumes e teores alcóolicos considerando uma destilação artesanal típica (MAIA e CAMPELO, 2005).

Tabela 5. Volumes e teores alcóolicos típicos de uma destilação em alambique (Adaptado de MAIA e CAMPELO, 2005).

FRAÇÃO	Volume Total (L)	Teor Alcólico (°GL)	Volume de Etanol (L)	Fração do volume de etanol do vinho (%)
Vinho	1000	8,5	85	100
Destilado de cabeça	7 - 10	67	4,7	5,5
Destilado de coração	170	46	73,6	<u>86,6</u>
Destilado de cauda	20	21,5	4,3	5,1
Vinhoto	800	0,3	2,4	2,8

Uma das operações que podem aumentar a eficiência da destilação é o refluxo, que consiste em condensar os vapores no interior da coluna, que retornam ao estado líquido e permitem um maior tempo de operação, aumentando assim a quantidade de componentes volatilizados. O diagrama de fases da água e etanol, apresentado na Figura 4, permite uma melhor compreensão do procedimento.

Figura 4. Diagrama de fases da mistura água e etanol para a destilação com refluxo (MAIA e CAMPELO, 2005).



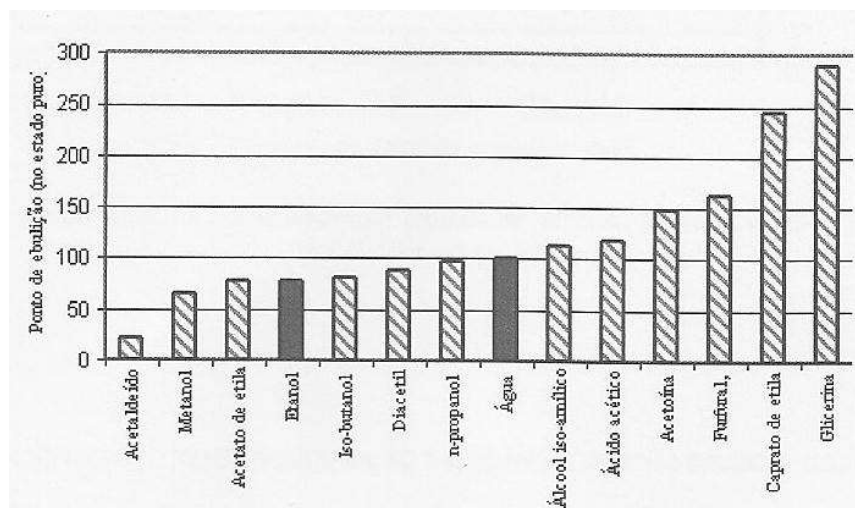
O ponto a, na abscissa, representa o volume de etanol no vinho inicial; o seu correspondente, b, na ordenada, é a graduação alcóolica dos primeiros vapores originados na destilação. Para as operações com refluxo, projeta-se o valor de b sobre a diagonal do diagrama e, novamente, determina-se o corresponde na curva principal, sendo o valor encontrado o novo teor alcóolico dos vapores. Dessa forma, o aumento da concentração de etanol nos vapores durante a destilação será tão maior quanto a frequência das condensações. Assim, para processos sem refluxo o teor alcóolico inicial será menor, aumentando a fração correspondente à cauda e, conseqüentemente, as perdas de etanol nesta porção e também no vinhoto (MAIA e CAMPELO, 2005).

A fim de garantir os melhores parâmetros, o deflegmador e o prato são fundamentais para este processo, uma vez que a sua ação no vapor, promovendo uma segunda evaporação a partir do condensado no prato, é equivalente à bidestilação, que garante um produto mais puro e translúcido (MAIA e CAMPELO, 2005).

Em relação à composição das frações da cachaça, esta é definida pela concentração dos componentes voláteis em cada uma delas. A temperatura do processo é definida pelo teor dos componentes majoritários, etanol e água, que evaporam a taxas diferentes e carregam outros compostos, os secundários, de acordo com diferentes parâmetros: solubilidade em água e em etanol, concentração no vinho e variação da concentração de etanol (LÉAUTÉ, 1990).

Analisando o processo quimicamente, as interações intermoleculares, seja entre mesmas moléculas ou entre componentes distintos, são o principal fator responsável pela volatilização ou não de determinado composto (MAIA e CAMPELO, 2005). A Figura 5 permite uma melhor compreensão acerca da composição da cachaça.

Figura 5. Pontos de ebulição dos componentes encontrados na cachaça (MAIA e CAMPELO, 2005).



Componentes com baixo ponto de ebulição são encontrados em maior concentração na cabeça, àqueles cujos valores são intermediários entre os do etanol e da água apresentam-se nas três frações e os de ponto de ebulição superiores a 100 °C surgem na cauda. O monitoramento ao longo do processo e a definição de pontos de corte criteriosos podem minimizar a presença de compostos indesejados no destilado de coração. Uma vez que as frações de cabeça e cauda apresentam componentes tóxicos para o consumo humano, podem ser armazenadas e destiladas para produzir etanol combustível, ou misturadas ao vinhoto, pois representam uma pequena fração do volume total do mesmo, e descartadas com ele (RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

3.4.3. O vinhoto

O vinhoto, também conhecido como vinhaça, é o resíduo final da destilação do mosto fermentado da cana-de-açúcar e corresponde, em média, a 80% do volume do mosto, de forma que, na produção de cachaça, para cada litro de coração produz-se 4,7 L de vinhoto, valor que aumenta para 13 L quando considera-se a produção de etanol. Durante anos o

destino desse resíduo eram as denominadas “áreas de sacrifício”. Com o passar do tempo, entretanto, o volume produzido aumentou e, com ele, os impactos ambientais tornaram-se mais significativos. Devido à sua composição, que é representada em $\frac{3}{4}$ por matéria orgânica, além dos elevados teores de potássio, a década de 80 foi marcada pelo início do aproveitamento deste resíduo para a fertirrigação das lavouras de cana. O principal problema do descarte em rios é que o balanço de oxigênio torna-se negativo, de tal forma que, a partir da safra de 1979, esta prática tornou-se crime passível de multa (LAIME et al, 2011).

3.4.3.1. Aproveitamento como subproduto

A proibição de descarte nos aquíferos e a previsão de aumento na produção da vinhaça estimularam instituições públicas e privadas, incluindo a própria indústria canavieira, a pesquisar alternativas para este impasse. Diversas foram as alternativas encontradas até o presente momento, sendo que a fertirrigação apresentou-se como sendo a mais promissora de todas (LAIME et al, 2011; RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

A aerobiose, processo bioquímico fundamentado na obtenção de energia através de nutrientes na presença de oxigênio, é apontada como uma tecnologia promissora para o manejo deste resíduo, uma vez que, através de duas etapas, aeróbia e anaeróbia, pode reduzir a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em valores superiores a 90%. O maior problema está na manutenção de tanques, com elevados volumes, para comportar a quantidade produzida de efluente (LAIME et al, 2011).

O vinhoto pode ainda ser utilizado como combustível da caldeira para a geração de energia para o alambique. Devido ao seu elevado teor de água, faz-se necessário evaporar a mesma, etapa onde reside o maior empecilho associado à técnica: os custos de evaporação da água não compensam a economia gerada pela caldeira. Um outro uso, menos difundido, é a adição do mesmo na massa do cimento. O gargalo desta alternativa são os custos de transporte, caso a fabricação dos materiais de construção ocorra em locais distantes àqueles onde o resíduo é originado (LAIME et al, 2011).

Considerando o uso deste resíduo no processo, existem três alternativas: a reciclagem na fermentação, limitada pelo fator de diluição 1/3; o seu uso na produção de leveduras, que requer suplementação com sais de amônia e magnésio; e fabricação de ração animal, que requer tratamentos para redução dos níveis de potássio, sendo que a ração produzida por vinhaça pode representar, no máximo, de 3 a 10 % da alimentação diária de suínos e ruminantes, respectivamente (LAIME et al, 2011; RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

Dentre os métodos de tratamento de efluentes, a biodigestão anaeróbia merece destaque, pois reduz significativamente a DBO e, conseqüentemente, a capacidade poluidora do efluente. A viabilidade econômica do processo é justificada pela produção de metano, de alto poder calorífico, o que não impede que hajam dificuldades: a desvalorização do biogás no mercado, a falta de investimentos em etapas anteriores de desenvolvimento, e a popularidade de outras técnicas (fertirrigação) (LAIME et al, 2011; RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

A aplicação da vinhaça no solo e a transição do seu papel de altamente poluente para fertilizante aconteceu na metade do século XX, quando determinou-se que ela não era ácida, pelo contrário, auxiliava na correção da acidez do solo e aumentava a capacidade de troca catiônica, sendo necessário que fosse aplicado anualmente, devido ao efeito pouco duradouro; pode-se, ainda, atribuir o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo, a melhoria de sua estrutura, o aumento da capacidade de retenção de água e o desenvolvimento de micro flora e fauna no solo à fertirrigação. A técnica é regulada pela legislação e estudos mostram que doses superiores à $1.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ impactam negativamente a produtividade da cana, uma vez que aumentam o tempo de maturação, reduzem o teor de sacarose aparente e incrementam os níveis de potássio e amido do caldo (LAIME et al, 2011; RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

Apesar da existência de diversos usos para a vinhaça, todas as plantas devem dispor de reservatórios (escavados ou suspensos) que possibilitem o armazenamento deste resíduo e garantam a segurança da região adjacente. Àquelas que utilizam o tanque escavado devem realizar análises de solo antes do início do armazenamento e, posteriormente, esta deve ser repetida anualmente para controle e monitoramento do impacto (COPAM, 2013). A tabela 6 apresenta as possibilidades de aproveitamento da vinhaça.

Tabela 6. Principais processos para utilização do vinhoto com as vantagens e desvantagens associadas a cada método (Adaptado de CORTEZ et al, 1992).

Processo/Produto Final	Vantagens	Desvantagens
Fertirrigação	Baixo custo Fácil de implantar	Elevado custo de transporte
Aerobiose	Produção de energia Redução da DBO	Grande área para os tanques
Combustão em caldeira	Produção de energia	Elevado custo para remoção da água
Massa de cimento	Menor custo de produção	Elevado custo de transporte
Produção de leveduras	Produção de proteínas	Requer suplementação Custos de evaporação da água
Biodigestão anaeróbia	Produção de metano Redução da DBO	Desvalorização do biogás Alternativas mais difundidas

3.5. Armazenamento e Envelhecimento

Após o fracionamento da destilação a cachaça está pronta, porém suas características sensoriais podem ser melhoradas através da maturação, com duração de dois a seis meses, ou do envelhecimento, que leva de um a três anos e promove melhorias também no valor agregado do produto (MAIA e CAMPELO, 2005).

A maturação ocorre, usualmente, em toneis de aço inox, onde não há transferência de componentes para a cachaça e a mesma permanece com aspecto límpido e sem coloração, sendo comercializada como “cachaça branca”. O fundamento da maturação é a oxidação parcial dos aldeídos, que depende da presença de oxigênio. Assim, pode-se preencher apenas parte do tonel com a cachaça, ou ainda promover a circulação da mesma dentro do tonel; um método mais eficiente, porém de custo mais elevado, consiste em borbulhar, suavemente, ar comprimido e filtrado na cachaça (MAIA e CAMPELO, 2005).

O envelhecimento é realizado em toneis de madeira, sendo que as mais utilizadas no Brasil são: carvalho europeu, amburana, amendoim, bálsamo, jequitibá e jatobá, e cada uma delas estão associadas a características peculiares de odor, paladar, brilho e cor devido aos taninos, à lignina, à estrutura porosa e sua interação com os componentes da cachaça, além da permeabilidade ao oxigênio (MAIA e CAMPELO, 2005).

Analisando quimicamente o processo de envelhecimento pode-se citar, dentre as reações que ocorrem: oxidação e esterificação, onde álcoois e aldeídos reagem e originam os ésteres; formação do complexo etanol-lignina que, posteriormente, é degradado e em álcoois que sofrem oxidação e produzem aldeídos, ácidos e ésteres, que atribuem aroma, sabor e cor à bebida; eliminação de compostos sulfurados; ocorre também a incorporação de flavonoides e taninos da madeira, aquisição de coloração amarelada, cuja intensidade varia em função do tipo de madeira, e também o aumento da oleosidade e viscosidade da cachaça (MAIA e CAMPELO, 2005; PINHEIRO et al, 2005).

Associado ao envelhecimento está a redução gradativa do teor alcóolico da cachaça, que deve ser previsto antes do armazenamento da mesma. Ocorre devido à temperatura do ambiente (determina a pressão de vapor do etanol), aos tratamentos aplicados na madeira (permeabilidade do etanol) e à umidade do ambiente externo (coesão e textura das aduelas). Estima-se a redução de 1 °GL por ano em condições ótimas de envelhecimento (temperatura inferior a 20 °C e umidade relativa do ar próxima de 85 %). É comum que ocorra a mistura de diferentes cachaças a fim de se obter um produto com características sensoriais superiores (MAIA e CAMPELO, 2005; RIBEIRO e RIBEIRO, 2014).

4. CONCLUSÃO

A produção de cachaça artesanal pode ser compreendida como uma série de etapas, as quais possuem parâmetros específicos envolvidos e que devem ser controlados a fim de se obter um produto final de qualidade. A compreensão dos requerimentos nutricionais da cana é necessário para que ela se desenvolva de forma adequada e apresente uma boa produtividade agrícola. Na extração do caldo, a eficiência da moagem define a quantidade de mosto que será enviado para a fermentação, onde o controle das variáveis – grau Brix do mosto, qualidade do pé-de-cuba, pH, temperatura, aeração, disponibilidade de substrato e concentração de etanol – devem ser controladas para que a produção seja maximizada. Na destilação, onde ocorre o fracionamento do destilado para a obtenção do produto de interesse, a fração de coração, o monitoramento da temperatura e do teor alcoólico é requerido a fim de garantir rendimentos aceitáveis ao processo. Por fim, na etapa de armazenamento onde ocorre o amaciamento (suavização das propriedades) da cachaça e, no envelhecimento, feito em toneis de madeira, a cachaça adquire propriedades únicas de coloração e odor através da interação com a madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFENORE, S.; CAMELEYRE, X.; BEUBADIS, L.; BIDEAUX, C.; URIBELARREA, J. L.; GOMA, G.; MOLINA-JOUVE, C.; GUILLOUET, S. E. **Aeration strategy: a need for very high ethanol performance in *Saccharomyces cerevisiae* fed-batch process**. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 63, n. 5, p. 537-542, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BEBIDAS (ABRABE). **Avaliação do mercado brasileiro de bebidas**. 2015. Disponível em: <<http://www.abrabe.org.br/categorias/>>. Acesso em 10 de maio de 2015.

BEAUCLAIR, E. G. F.; SCARPARI, M. S.; Noções fitotécnicas. In. RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y.; **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Barros e Marques Editoração Eletrônica, 2006. v.1. 216p.

BOSQUEIRO, A. C. **Composição química da aguardente de cana-de-açúcar ao longo do processo de dupla destilação em alambique simples**. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 13 de 29/6/ 2005**, Diário Oficial da União, Brasília, 30/6/2005.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Safra 2014/15, n. 3 - Terceiro Levantamento**. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_12_19_09_02_49_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_2014-15.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2010.

COPAM. Deliberação Normativa Nº 184 de 13/06/2013. Disponível em: <<https://legisweb.com.br/legislacao/?id=255377>>. Acesso em 10 de maio de 2015.

CORTEZ, L.; MAGALHÃES, P.; HAPP, J. **Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização**. Revista Brasileira de Energia, Campinas, v. 2, n. 2, p. 111-146, 1992.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja – Região Central do Brasil – 2001/2002.** Londrina: Embrapa Soja. 2001.

FARIA, J. B. **Sobre a produção de aguardente de cana.** *O Engarrafador Moderno*, n. 40, p. 9-16, 1995.

JANINI, D. A. **Análise operacional e econômica do sistema de plantio mecanizado da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*)** 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

JERONIMO, E. M.; OLIVEIRA, E. S.; SOUZA, E.L.R.; SILVA, M. A.; SERRA, G.E. **Addition of protein nitrogen during alcoholic fermentation for the production of cachaça.** *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.65, n.2, p.161-168. 2008.

LAIME, E. M. O.; FERNANDES, P. D.; SOUZA, D. C.; FREIRE, E. A. **Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão.** *Revista Trópica*, Chapadinha, v.5, n.3, p. 16-29, 2011.

LALUCE, C.; PALMIERI, M. C.; CRUZ, R. C. L. **Growth and fermentation characteristics of new selected strains of *Saccharomyces* at high temperatures and high cell densities.** *Biotechnology and Bioenergy*, v. 37, p. 528-536, 1991.

LÉAUTÉ, R. **Distillation in alambic.** *American Journal of Enology and Viticulture*, Davis, v.41, n.1, p. 90-103, 1990.

LIN, Y.; ZHANG', W.; LI, C., SAKAKIBARA, K.; TANAKA, S.; KONG, H. **Factors affecting ethanol fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* BY4742.** *Biomass and Bioenergy*. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.019>> Acesso em 10 de maio de 2015.

LINDQUIST, S. **Heat shock proteins and stress tolerance in microorganisms.** *Current Opinion in Genetics & Development*, v. 2, n. 5, p. 748-755, 1992.

LUZ, P. H. C.; VITTI, G. C.; QUINTINO, T. A.; OLIVEIRA, D. B. **Utilização de adubação verde na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba, 2005. Disponível em: < http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/aduba%25E7%25E3o+verde+em+cana-deacucar_000fizudqsj02wyiv802hvm3jh538eng.pdf>. Acesso em: 05 de maio de 2015.

MAIA, A. B. R. A. e CAMPELO, E. A. P. **Tecnologia da cachaça de alambique**. Belo Horizonte: SEBRAE/MG; Sindbebedas, 2005.

NOVAES, F.V. **Cachaça de alambique x aguardente industrial**. *O Engarrafador Moderno*, n. 72, p. 46-49, 2000.

OLIVEIRA, C. R.; GARÍGLIO, H. A. A.; RIBEIRO, M. M.; ALVARENGA, M. S. P.; MAIA, F. X. **Cachaça de alambique: manual de boas práticas ambientais e de produção**. 2. ed. Belo Horizonte: SEMAD-FEAM, 2005.

PATARO, C.; GOMES, F. C. O.; ARAÚJO, R. A. C.; ROSA, C. A.; SCHWAN, R. F.; CAMPOS, C. R.; CLARET, A. S.; CASTRO, H. A. **Utilização de leveduras selecionadas na fabricação da cachaça de alambique**. Informe Agropecuário, EPAMIG, Belo Horizonte, v. 23, n 217, p. 37-43, 2002.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Acompanhamento da safra 2011/2012 – Centro-Sul**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2012.

PEIXOTO, A. A.; BERTO, P. N. A.; THURLER, A. M.; DELGADO, F. R. M. C. R. **Densidades de plantio com três variedades de cana-de-açúcar em sulcos de base estreita e de base larga**. Brasil Açucareiro. Rio de Janeiro, v. 106, n. 2, p. 28 – 32, 1988.

PINHEIRO, P. C.; LEAL, M. C.; ARAÚJO D. A. **Origem, produção e composição química da cachaça**. Química Nova na Escola nº 18, 2003.

RIBEIRO, J.C.G.M. **Fabricação Artesanal de Cachaça Mineira**. 2 ed. Belo Horizonte: O Lutador, 2002.