

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**HENRIQUE ALEXSANDER VAZ SOLON**

**PROJETO DE UMA MINIFÁBRICA DE CACHAÇA ARTESANAL**

**UBERLÂNDIA  
OUTUBRO DE 2021**

**HENRIQUE ALEXSANDER VAZ SOLON**

**PROJETO DE UMA MINIFÁBRICA DE CACHAÇA ARTESANAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador: Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes**

**UBERLÂNDIA  
OUTUBRO DE 2021**

## RESUMO

A produção e venda de cachaça artesanal e aguardente é uma situação que está crescendo bastante no Brasil nos últimos anos e é importante como uma forma de comercialização de produtos agropecuários, como é a utilização da cana-de-açúcar como meio para a produção do produto final, nesse caso. Para se adequar às regras de comercialização, no entanto, uma fábrica de cachaça artesanal deve ter em seu espaço todo um ambiente propício para que todas as etapas do processo de produção sejam realizadas da melhor maneira possível, e são elas: recepção e descarregamento, moagem, filtração e decantação, preparo do mosto, fermentação, destilação, filtração, envelhecimento e engarrafamento. Além disso, é muito importante que a indústria ajuste todo o modelo de produção para que a cachaça produzida esteja sempre dentro dos parâmetros de qualidade impostos pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e pelo MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). Em conformidade com todo esse processo de produção, o presente trabalho elabora a estrutura uma mini fábrica de cachaça artesanal com uma produção de 1000 litros diários totalmente condizente com os parâmetros impostos por esses órgãos e com a melhor qualidade possível. Para obter um bom processo produtivo e um excelente produto final para comercialização, é exemplificado nesse trabalho todos os principais equipamentos, cálculos e etapas necessárias dentro da mini fábrica, com o objetivo voltado essencialmente para a área térmica, baseado nos cálculos utilizando a primeira lei da termodinâmica. Finalmente, a estruturação da mini fábrica é finalizada dentro do quadro ideal dos parâmetros de produção e comercialização. E ainda, foi elaborada uma planta baixa da infraestrutura necessária para que seja construído e alocado corretamente o espaço físico da mini fábrica.

## ABSTRACT

The production and sale of “cachaça” and brandy is a situation that is growing considerably in Brazil in recent years and is important as a form of marketing of agricultural products, as is the use of sugarcane as a means for the production of the final product, in this case. In order to adapt to the marketing rules, however, a craft cachaça factory must have in its space a favourable environment for all stages of the production process to be carried out in the best possible way, and they are: reception and unloading, grinding, filtration and decanting, preparation of the must, fermentation, distillation, filtration, aging and bottling. In addition, it is very important for industry to adjust the entire production model so that the cachaça produced is always within the quality parameters imposed by INMETRO (National Institute of Metrology, Quality and Technology) and MAPA (Ministry of Agriculture, Livestock and Supply). In accordance with all this production process, the present work elaborates the structure a mini craft craft cachaça factory with a production of 1000 liters per day totally consistent with the parameters imposed by these organs and with the best possible quality. In order to obtain a good productive process and an excellent final product for commercialization, all the main equipment, calculations and necessary steps within the mini factory are exemplified in this work, with the objective focused essentially on the thermal area, based on the calculations using the first law of thermodynamics. Finally, the structure of the mini factory is finalized within the ideal framework of production and marketing parameters. In addition, a floor plan was drawn up of the infrastructure needed to correctly build and allocate the physical space of the mini factory.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de produção da aguardente de cana.....	8
Figura 2: Modelo de setor de extração e preparo do caldo de uma mini destilaria.....	10
Figura 3: Etapas do processo de fermentação alcoólica para a produção de aguardente. ....	11
Figura 4: Esquema de alambique simples para a produção de aguardente.....	12
Figura 5: Constituição esquemática de um terno de moenda.....	14
Figura 6: Esquema do decantador de caldo extraído .....	14
Figura 7: Processo de fermentação por batelada alimentada com reciclo do fermento por decantação. ....	15
Figura 8: Tonéis novos de carvalho francês e americano para o envelhecimento de cachaça na destilaria da ESALQ/USP.....	16
Figura 9: Esquema da escala laboratorial de cobre e geometrias consideradas para os cálculos de perda de calor. ....	18
Figura 10: Layout e planta baixa com vista superior da Destilaria.....	24

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CACHAÇA ARTESANAL .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>EQUIPAMENTOS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
2.1.1	MOENDA .....	14
2.1.2	DECANTADOR.....	14
2.1.3	FERMENTAÇÃO.....	15
2.1.4	DESTILAÇÃO.....	15
2.1.5	ENVELHECIMENTO.....	16
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DOS PROCESSOS NO SISTEMA DE PRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>FILTRAGEM, DECANTAÇÃO E DILUIÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>FERMENTAÇÃO E DESTILAÇÃO .....</b>	<b>17</b>
3.2.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	18
3.2.2	ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO DA MINIFÁBRICA DE CACHAÇA ARTESANAL.....	19
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>27</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com um consumo elevado no Brasil e no mundo, a cachaça é a segunda bebida mais consumida no país, atrás apenas da cerveja, com um consumo diário estimado de 70 milhões de doses e consumo per capita de 6 litros/habitante/ano (Viana, 2008).

Cachaça, considerada uma denominação típica da aguardente de cana produzida no Brasil, é obtida pela destilação do mosto fermentado de cana-de-açúcar com características sensoriais peculiares, também podendo ser adicionada de açúcares até seis gramas por litro, expressos em sacarose.

A cachaça pode ser produzida de duas formas: de modo artesanal e industrial e é um símbolo da comunidade e identidade brasileira, retratada por ser uma das bebidas com mais destaque em vários bares e restaurantes badalados do mundo.

Esses dados mostram a relevância dessa bebida e a alta demanda pelo produto, que deve obedecer a padrões de qualidade estabelecidos pela legislação brasileira (INMETRO, 2004). A cachaça obtida pela destilação descontínua tem maior aceitação em certos mercados, o que caracteriza um produto mais seletivo e de maior valor comercial, mas a cachaça mais produzida no Brasil é obtida através da destilação contínua.

Além disso, é interessante atentar-se aos anuários disponibilizados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), para visualizar nos dados de registros de cachaças e aguardentes no Brasil sobre o número de produtores de cachaça e aguardente de cana, o número de registros no MAPA e, também, a quantidade de marcas associadas.

Apesar de o mercado de cachaça de cana-de-açúcar sempre ter sido caracterizado pelo consumo na classe de baixa renda, o cenário dos últimos anos vem sofrendo alterações e mostra que há maior procura de consumidores de maior poder aquisitivo, ou seja, que pagam melhor preço pelo produto e que, também, exigem mais qualidade.

Com esse aumento de demanda por todas as classes, foram surgindo locais especializados na venda desse tipo de bebida. As cachaçarias são os lugares onde os apreciadores da cachaça podem escolher, entre diversas marcas artesanais e industriais disponíveis, a sua cachaça favorita.

Assim, o empreendedor do local também deve escolher se atuará apenas como varejo de cachaças ou se atuará como bar, com espaço para mesas e horário de funcionamento noturno.

Além disso, a cachaça é exportada para mais de 60 países, porém, apenas 1% do total produzido é exportado. Alemanha, Estados Unidos, Portugal, Paraguai e França são os principais compradores (SEBRAE, 2021).

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo identificar e descrever todos os principais equipamentos necessários para a concepção e estruturação de uma destilaria de cachaça artesanal, considerando uma capacidade estimada de produção de mil litros diários e com foco maior na etapa de fermentação do mosto.

Assim, é possível citar que os principais processos a serem analisados e estudados para a identificação dos equipamentos e sistemas da destilaria, são: moagem da cana, filtração e decantação do caldo, diluição do caldo, fermentação do mosto, destilação do vinho, armazenamento da cachaça, envelhecimento da cachaça, padronização da cachaça, filtração da cachaça, rotulagem e expedição.

Finalmente, com o objetivo de abordar o problema de maneira didática, o presente trabalho foi dividido em capítulos. No Capítulo 2, é feita uma revisão da literatura abordando todos os processos de fabricação da cachaça. No Capítulo 3, a metodologia de cada etapa do processo é apresentada e explicada com o objetivo de deixar claro toda a estruturação de uma destilaria de cachaça artesanal. As discussões pertinentes ao trabalho, são apresentados no Capítulo 4. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões realizadas.



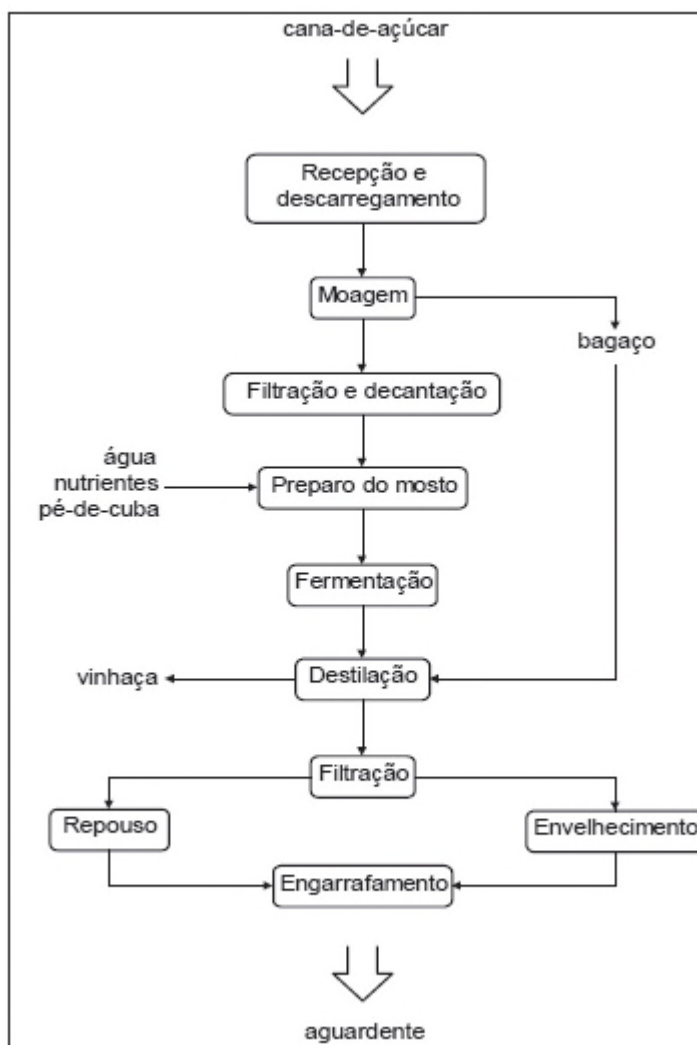
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo abordará uma revisão de literatura com todos os processos principais presentes em uma fábrica de destilaria de cachaça artesanal.

### 2.1 O processo de fabricação da cachaça artesanal

O processo de fabricação de aguardente de cana, geralmente conhecida pela cachaça artesanal, envolve as seguintes principais etapas: recepção e descarregamento, moagem, filtração e decantação, preparo do mosto, fermentação, destilação, filtração e engarrafamento. Também existem etapas secundárias que são primordiais para a qualidade final do produto, como o repouso e o envelhecimento (CHAVES *et al.* 2003).

Na Figura 1, é possível visualizar um fluxograma geral e ilustrativo de todo o processo de fabricação de cachaça, exemplificando todas as etapas.



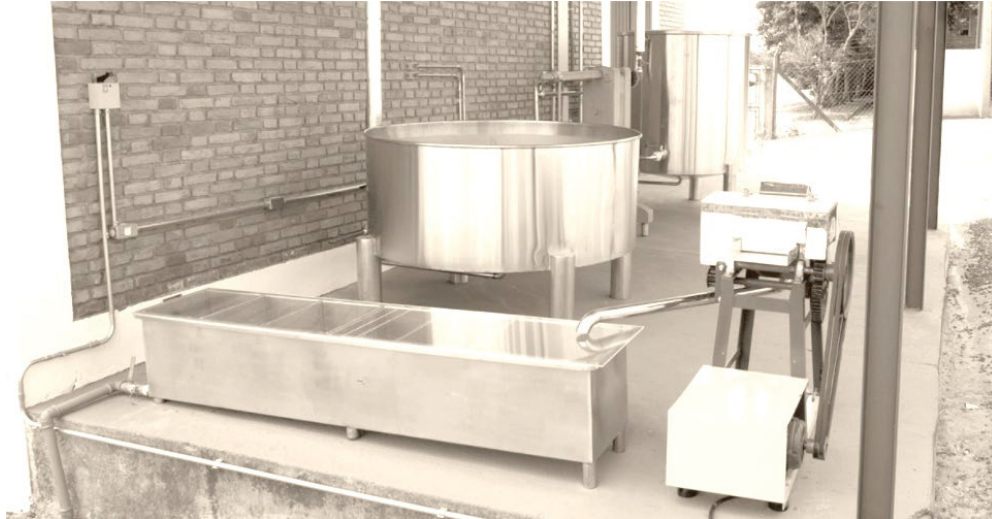
**Figura 1:** Fluxograma de produção da aguardente de cana  
Fonte: (Chaves *et al.*, 2003), p. 9.

Na primeira etapa, a cana-de-açúcar chega na planta industrial em caminhões, sendo que a quantidade de matéria-prima recebida deve ser suficiente para a moagem diária. Além disso, é extremamente essencial que a operação de fábrica de aguardente tenha o corte programado, com a quantidade viabilizada de acordo com a capacidade, para que se mantenha o tempo de espera entre o corte e o início da fermentação dentro do limite de 24 horas (CHAVES *et al.* 2003).

A moagem da cana, segunda etapa do processo, deve ocorrer, preferencialmente, no mesmo dia que a cana for cortada e a alimentação da cana-de-açúcar na esteira ou no engenho deve ser o mais uniforme possível para evitar a diminuição da capacidade de extração. É fundamental que a cana esteja limpa para a moagem, sem terras, palhas e outras impurezas que, além de prejudicarem o processo aumentando o volume de fibra a ser prensada no moinho, sem até mesmo contribuir para o aumento da quantidade, podem contaminar o caldo e, posteriormente, o fermento, reduzindo a capacidade de fermentação e piorando a qualidade da cachaça (CHAVES *et al.* 2003).

Para evitar maiores problemas na fermentação oriundas dessas impurezas, é necessário que o caldo de cana-de-açúcar passe pela terceira etapa, que é o processo de filtração e decantação. Basicamente, a filtração é feita ao instalar uma tela (filtro) na saída da bica, junto ao decantador. Esse decantador pode ter até 4 divisões, sendo que a cada uma o caldo decanta o material que passou pela tela e na última, o caldo sai livre de impurezas e com ótimas condições para que seja realizada a leitura do Brix inicial, que vai determinar quanto de água é preciso na diluição e, assim, ajustar o Brix de moagem do dia (Viana, 2008).

Além dessa etapa de decantação, é necessário avaliar se o mosto (líquido açucarado passível de sofrer fermentação) apresenta grau Brix ideal para a fermentação, o que seria entre 16 a 18. Ou seja, quando for necessário, o caldo extraído deve ser diluído em água potável e declorada, pois assim seu Brix permanecerá dentro da faixa ideal para fermentação. Os tanques diluidores devem ser instalados entre o decantador e as dornas de fermentação, como mostra a Figura 2 (ALCARDE, 2017).



**Figura 2:** Modelo de setor de extração e preparo do caldo de uma mini destilaria.  
Fonte: (ALCARDE, 2017), p. 41.

Realizar o tratamento químico do mosto é uma maneira de garantir ainda mais a qualidade química e microbiológica do caldo. Esse tratamento consiste em aquecê-lo a temperaturas entre 70°C e 100°C, com posterior resfriamento natural em tanque apropriado (ALCARDE, 2017).

Na sequência após o preparo do mosto, é necessário que seja realizada a etapa de fermentação do caldo. Durante esse processo, ocorre a transformação dos açúcares simples em álcool, como são os exemplos da glicose e frutose. E, além desses açúcares simples, também existe a sacarose, que possui maior presença em quantidade no caldo, e é quebrada em açúcares simples para haja a alimentação das leveduras – verdadeiras responsáveis por essa transformação dos açúcares em álcool (VIANA, 2008).

De acordo com Alcarde (2017, p. 42):

“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.”

A preparação do pé-de-cuba pode apresentar variações no tipo e na proporção dos ingredientes. Algumas dessas variações podem ser observadas a seguir:

Pé-de-cuba natural ou caipira: é geralmente um fermento muito rústico e que está ao alcance da mão, já que provém da inoculação do pé com raças que despencam sobre ele durante o preparo ou que vêm do próprio campo, com a cana.

Pé-de-cuba misto ou prensado: esse fermento prensado foi preparado com o objetivo de servir propósitos da panificação, em que também ocorre um processo de fermentação alcoólica. Portanto, é possível notar nele algumas características desejáveis para a produção de cachaça.

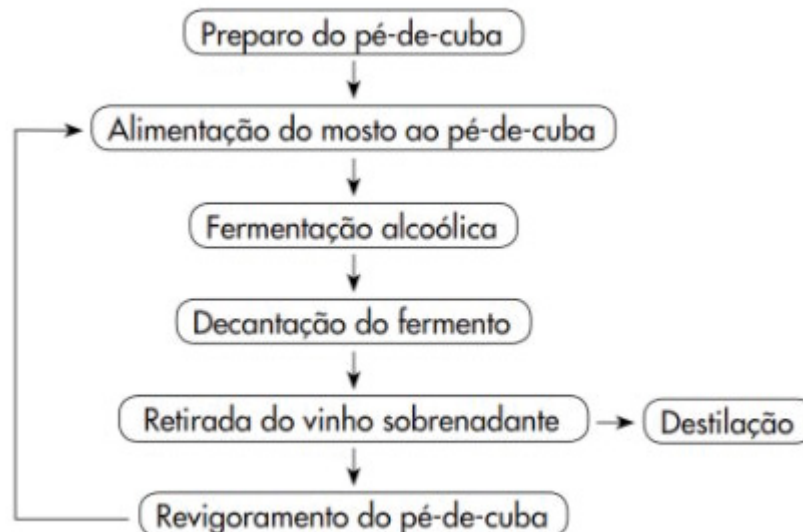
Assim, é preciso avaliar qual será o tipo de fermento utilizado e quais são suas vantagens dentro do processo para garantir a qualidade e o tempo da produção de aguardente (CHAVES *et al.* 2003).

É muito importante que haja uma administração da fermentação pelo produtor para evitar a contaminação do mosto, sendo que a própria medição do pH do mosto possibilita identificar se houve contaminação ou não. Quando o Brix do mosto atingir 0°, começa a ser considerado vinho e estará pronto para a destilação (VIANA, 2008).

Ao analisar na prática, é possível identificar a conclusão da fermentação quando o mosto adquire uma coloração mais clara, com formação de algumas bolhas uniformes e liberação de odores satisfatórios, com leve aroma de frutas (OLIVEIRA, 2010).

Logo após o término do ciclo de fermentação, é necessário que o vinho seja destilado para evitar o desenvolvimento de bactérias contaminantes e as consequentes fermentações secundárias. O desenvolvimento dessas situações “não previstas” pode levar ao consumo de etanol e à formação de produtos secundários da fermentação, como exemplo dos álcoois superiores e ácidos orgânicos (ALCARDE, 2017).

A Figura 3 mostra todas as etapas do processo de fermentação alcoólica para produção de aguardente.



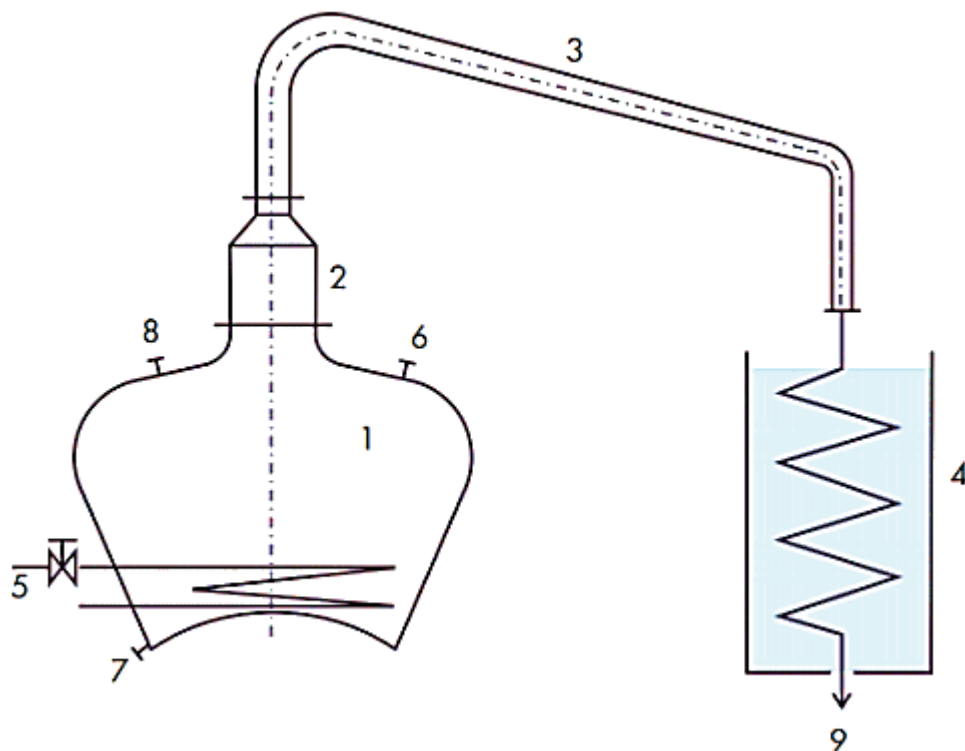
**Figura 3:** Etapas do processo de fermentação alcoólica para a produção de aguardente.  
Fonte: (ALCARDE, 2017), p. 48.

O vinho contendo de 7 a 10% de volume em álcool a 20°C é encaminhado para a cuba do destilador para iniciar o processo que vai separar e selecionar os produtos de acordo com as temperaturas de ebulição e é a partir do álcool do vinho que se obtém a cachaça (VIANA, 2008).

A cachaça é determinada com uma boa graduação alcóolica, de maneira a atender as exigências legais, quando possui entre 38 e 48% em volume e, por isso, o vinho deve ser destilado com a finalidade de aumentar o teor alcoólico (Oliveira *apud* AMPAQ, 2010).

O processo de destilação na produção de aguardente pode ser efetuado em alambiques ou colunas contínuas e podendo ter até três corpos e retificadores. No caso do processo nos alambiques, é possível afirmar ser um sistema intermitente em que a caldeira é alimentada com vinho que, mediante aquecimento, emite vapores hidroalcoólicos que são conduzidos até o condensador, resultando no destilado alcoólico (ALCARDE, 2017).

A Figura 4 mostra como é o esquema de destilação em alambique simples. O esquema é composto pela (1) caldeira, (2) capitel, (3) alonga, (4) condensador/resfriador, (5) vapor para aquecimento, (6) entrada de vinho, (7) descarga de vinhaça, (8) válvula equalizadora de pressão e (9) saída de aguardente.



**Figura 4:** Esquema de alambique simples para a produção de aguardente.  
Fonte: (Alcarde, 2017), p. 55.

Já no caso das colunas de destilação há uma sequência de pratos superpostos e que, basicamente, funcionam como caldeiras independentes. Então os vapores gerados no prato inferior são conduzidos ao prato superior e assim sucessivamente, até chegarem no topo da coluna, onde serão redirecionados para os condensadores. A aguardente produzida por essa maneira de destilação é denominada multidestillada, pois teoricamente sofre tantas destilações quanto for o número de pratos (ALCARDE, 2017).

Então, no processo de destilação, há três frações de destilados, são eles: cabeça, coração e calda. A principal fração para produção da cachaça que deve ser separada é o coração, que é correspondente a cerca de 10% do volume de aguardente a ser produzido, assim como a calda, que define o ponto de corte da destilação. Assim, o coração deve estar sempre dentro dos padrões de qualidade impostos pela legislação brasileira (INMETRO, 2004) (VIANA, 2008).

Logo após a destilação, a cachaça ainda não está adequada para consumo. É necessário que haja um período variável de dois a três meses de repouso para evitar que seu sabor e gosto fiquem irregulares e agressivos, e assim, ela possa se enquadrar e completar a sua qualidade sensorial (CHAVES *et al.* 2003).

O armazenamento dessa aguardente recém destilada e que deve permanecer em repouso, deve ser feito em tonéis de madeira ou algum outro material inerte para evitar que haja influência desse material no aroma e no paladar da bebida (Oliveira *apud* IMA, 2010).

Para atingir as condições ideais e de melhor qualidade da aguardente, é importante que ocorra um envelhecimento da mesma. Esse período de envelhecimento varia entre 8 a 12 meses, sendo que deve ser feito em condições ambientes de temperatura e umidade equilibradas para que o produto não sofra alterações significativas. E, também, o local para envelhecimento deve ser fixo para que o produto fique em total repouso, sendo que os recipientes mais utilizados são feitos de alguns tipos de madeira, como carvalho, bálsamo, amendoim, vinhático, ipê, cerejeira, e sassafrás (VIANA, 2008).

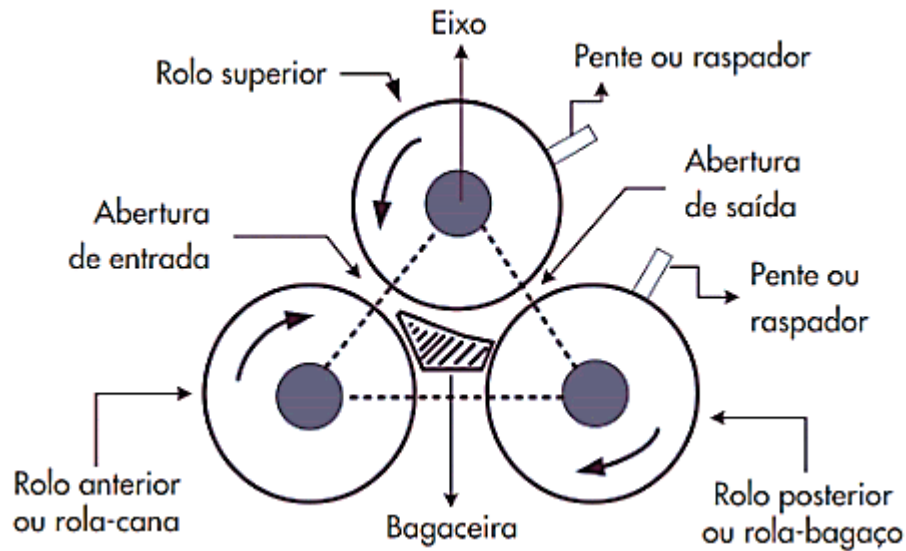
Após o processo de destilação e envelhecimento da aguardente, deve ocorrer o processo de filtração para eliminar partículas em suspensão e deixar a bebida transparente e brilhante (Oliveira *apud* Dias, 2010). Assim, é recomendado o uso de filtros de celulose ou materiais que não afetem as propriedades químicas, no paladar e no aroma da cachaça (Oliveira *apud* Ribeiro, 2010).

E por fim, o processo final de engarrafamento é realizado de acordo com os recipientes do produtor e a cachaça pode ser distribuída e comercializada.

## 2.2 Equipamentos do Processo de Produção

### 2.1.1 Moenda

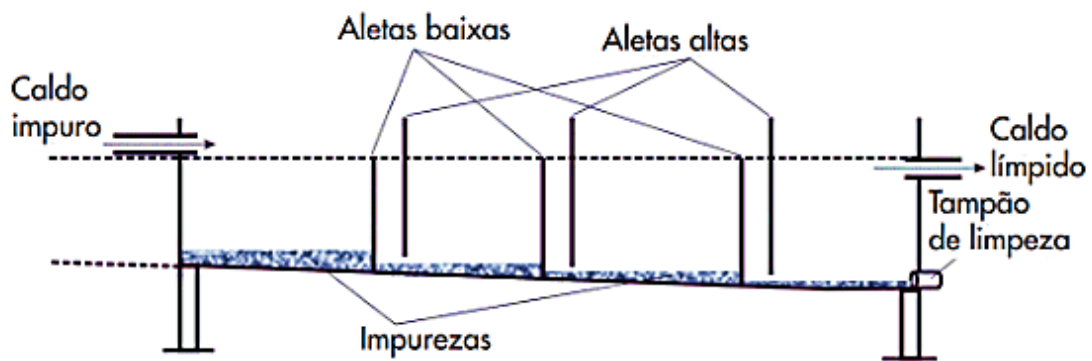
As moendas são utilizadas em um dos primeiros momentos do processo de produção. Geralmente, utilizando somente um único terno de moenda (Figura 5), que seja bem regulado e com cana picada, é possível chegar à extração de 65% do caldo da cana-de-açúcar (SEBRAE, 1999).



**Figura 5:** Constituição esquemática de um terno de moenda.  
Fonte: (ALCARDE, 2017), p. 38.

### 2.1.2 Decantador

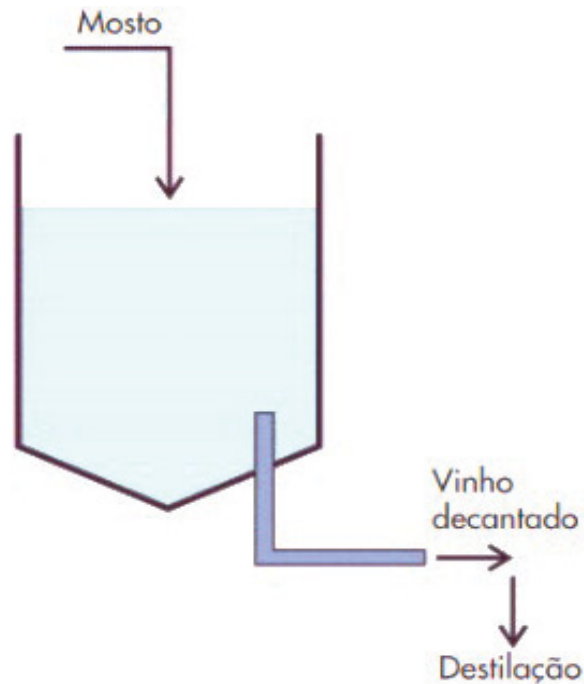
Após o processo na moenda, há a importância da filtragem das impurezas presentes no caldo antes que ele possa entrar nas dornas de fermentação (DE OLIVEIRA *et al.*, 2016). Para isso, há a presença do decantador (Figura 6).



**Figura 6:** Esquema do decantador de caldo extraído  
Fonte: (ALCARDE, 2017), p.39

### 2.1.3 Fermentação

Assim que a concentração inicial de açúcar no mosto estiver adequada para que o fermento funcione bem, dá-se início ao processo que ocorre nas dornas de fermentação que são demonstradas pela Figura 7 **Fonte bibliográfica inválida especificada..**



**Figura 7:** Processo de fermentação por batelada alimentada com reciclo do fermento por decantação.  
Fonte: (ALCARDE, 2017), p. 46.

### 2.1.4 Destilação

Ao finalizar o processo de fermentação, o produto gerado é retirado e enviado para o destilador. Nessa parte do processo, utilizando-se de um esquema de alambique, como já mostrado na Figura 4 por exemplo, as substâncias que se fazem presentes nessa mistura são transformadas em vapor, condensadas e resfriadas (DE OLIVEIRA *et al.*, 2016).



### 2.1.5 Envelhecimento

Já no final do processo, com o objetivo de aprimorar a qualidade do produto final, ocorre o processo de envelhecimento que naturalmente é feito em tonéis de madeira (Figura 8) que, por recomendação, não devem estar totalmente cheios para que haja acesso de oxigênio à bebida.



**Figura 8:** Tonéis novos de carvalho francês e americano para o envelhecimento de cachaça na destilaria da ESALQ/USP.

Fonte: (ALCARDE, 2017), p. 73.

### 3 METODOLOGIA DOS PROCESSOS NO SISTEMA DE PRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo analisar separadamente cada processo presente no sistema de produção de cachaça artesanal.

#### 3.1 Filtragem, decantação e diluição

Após o processo simples de moagem já citado nesse projeto, o caldo extraído nas moendas deve sofrer uma limpeza através de um processo de filtração seguida de decantação. Essa limpeza do caldo que será destinado à fermentação reduz consideravelmente as chances de haver contaminações indesejáveis, o que ajuda bastante a melhorar a qualidade da fermentação (OLIVEIRA, 2010).

Além dessa limpeza, é muito importante que o caldo esteja em um grau Brix adequado para que o processo seja facilitado e resulte em maior qualidade e menos dornas necessárias para a etapa da fermentação. Para isso, a diluição do caldo com água é praticamente sempre necessária para que a faixa do Brix inicial do caldo esteja entre 12° a 16° Brix (CHAVES *et al.* 2003).

Essa diluição pode ser feita de maneira mais prática ao adicionar água e o caldo de forma simultânea na dorna de fermentação e seguir acompanhando o grau Brix da mistura. Ou, também, é possível calcular a quantidade necessária de água a ser adicionada em certo volume de caldo, como é exemplificado na fórmula seguinte:

$$A = (C(G - g))/g \quad \text{Equação 1}$$

em que:

A = quantidade de água

C = quantidade de caldo integral

G = grau Brix do caldo integral

g = grau Brix desejado na mistura

#### 3.2 Fermentação e destilação

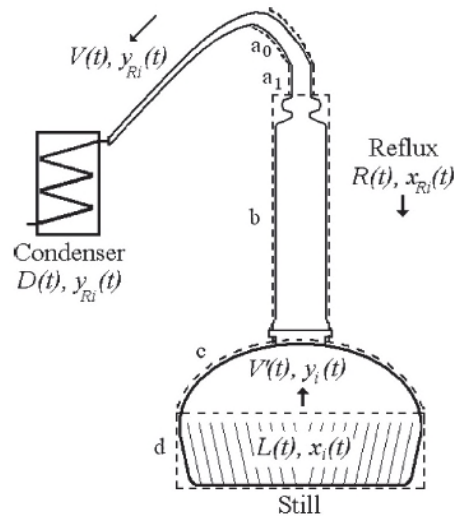
Com o objetivo de utilizar a modelagem matemática para entender melhor o processo de fermentação e destilação, é preciso ter como base e considerar alguns experimentos já realizados em laboratórios. De acordo com os experimentos de Scanavini, et al. (2010), é importante utilizar e considerar os cálculos de equilíbrios líquidos a vapor (VLE) de forma precisa em ambas as fases de um modelo de destilação diferencial que simula a produção de cachaça em um único passo de alambique. Além disso, foi incorporado na modelagem matemática o efeito de refluxo natural também.

Visto que foi necessária uma análise experimental mais completa e rigorosa, foram realizados dois ensaios experimentais em um laboratório para validar os resultados da simulação do Scanavini, et al. (2010).

### 3.2.1 Procedimento experimental

Alguns experimentos foram realizados na cidade de Campinas, estado de São Paulo, Brasil, considerando condições de 854 metros de altitude e 94605,55 Pa de pressão atmosférica, com duas amostras de suco fermentado de cana-de-açúcar, também conhecido como vinho. Nos dois ensaios foram utilizados sucos com volume de 8 L, sendo que no primeiro o vinho tinha uma graduação alcoólica de 9,8° GL (graus GayLussac), e o segundo, com 10,0° GL (SCANAVINI *et al.*, 2010).

A Figura 9 exemplifica o esquema em que ocorreram as destilações, e, é possível notar que a parte superior do destilador ainda não estava isolada, assim as perdas convectivas de calor não foram evitadas. Isso resultou em uma condensação perto da parede da folha de cobre, causando um pequeno refluxo (SCANAVINI *et al.*, 2010).



**Figura 9:** Esquema da escala laboratorial de cobre e geometrias consideradas para os cálculos de perda de calor. Fonte: (SCANAVINI *et al.*, 2010), p. 229.

O experimento se deu com um aquecimento do alambique com fogo direto e sendo controlado manualmente utilizando uma válvula de injeção de gás. A fim de evitar espuma que contaminaria o destilado e anularia o experimento, a intensidade do fogo foi alterada durante o processo de destilação. O alambique foi então carregado com vinho e o tempo “zero” foi definido assim que a primeira gota de destilado foi coletada após passar pelo condensador (SCANAVINI *et al.*, 2010).

A imersão de um termômetro ( $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ) no líquido foi de grande importância para medir as temperaturas de ebulição do vinho ao longo dos experimentos e em intervalos de 2 minutos (SCANAVINI *et al.*, 2010).

O processo de destilação da cachaça permite que três frações diferentes de destilado sejam separadas de acordo com a sua graduação alcoólica e sua temperatura de ebulição, ou, também, com o seu volume de destilado coletado. A segunda fração é a que mais representa a cachaça brasileira, sendo chamada de destilado coração e considerada a mais rica em álcoois superiores (SCANAVINI *et al.*, 2010).

Considerando as três frações, os destilados da primeira fração tinham 68 e 70 ml, e foram separados em 2,9 e 8,5min; os destilados de segunda fração tinham ambos 1,35 L a 73,5 e 74 min; e por fim, os destilados da terceira fração tinham ambos 150 ml e foram separados em 80,7 e 80 min após o “zero” definido, para os experimentos nº 01 e nº 02, respectivamente (SCANAVINI *et al.*, 2010).

### **3.2.2 Estruturação do projeto da minifábrica de cachaça artesanal**

Como demonstrado na seção 2.1, este projeto será modelado de acordo com esta estruturação de etapas para a minifábrica de cachaça artesanal com capacidade de 1000 litros diários.

A minifábrica possuirá uma estrutura adequada para a recepção e descarregamento da cana-de-açúcar em caminhões diariamente, adequando uma programação para corte dessa matéria-prima com o objetivo de manter o tempo de espera entre o corte e o início da fermentação em até 24 horas.

No mesmo dia em que ocorrer esse corte programado, o material será analisado e limpo, caso necessário, e seguirá para moagem no engenho com uma alimentação mais uniforme possível da cana-de-açúcar para melhorar a capacidade de extração.

Logo após a extração do caldo na moenda, a minifábrica possuirá uma estrutura adequada para a filtração e decantação, com a instalação de uma tela na saída da bica, junto ao decantador, de maneira que o caldo que seguirá para fermentação esteja o mais límpido possível. Além disso, é importante realizar a diluição em água potável e decolorada para ajustar o grau Brix do caldo para obter melhor qualidade no resultado final do produto.

Assim, a partir do cálculo de diluição para 1000 litros de caldo, com grau Brix igual a 20 a ser diluído para grau Brix igual a 14, demonstra-se utilizando a Equação 1 já apresentada na seção 3.1 que a quantidade de água necessária a ser adicionada será:

$$A = \frac{1000(20 - 14)}{14} = \frac{6000}{14} = 428,60$$

Então, a quantidade a ser adicionada, nesse caso, para 1000 litros de caldo, será de 428,60 litros de água (CHAVES *et al.* 2003).

A partir do momento em que o grau Brix do caldo já estiver ajustado, será necessário aquecer esse mosto a temperaturas entre 70°C e 100°C, com posterior resfriamento natural em um tanque apropriado, para garantir mais qualidade química e microbiológica do caldo.

Para calcular o calor necessário para aquecer os 1000 litros de caldo com a adição da água para diluição, ou seja, uma substância com um total de 1428 litros de volume, é importante utilizar a primeira lei da termodinâmica, associada às propriedades de cada substância na literatura.

Primeiramente, é necessário calcular o calor específico da mistura do mosto com a água. Para isso, foram utilizados os valores de calor específico tanto da cana-de-açúcar, quanto da água, encontrados na literatura, como são descritos:

- $c_{v_{H_2O}} = 4,2 \cdot 10^3 \frac{J}{Kg.K}$  ;
- $c_{v_{cana}} = 3,1 \cdot 10^3 \frac{J}{Kg.K}$  .

Esses valores foram utilizados em uma fórmula para cálculo médio do calor específico da mistura, como apresentado na equação 2:

$$c_{v_{mistura}} = x_i c_{v_{H_2O}} + x_f c_{v_{cana}} \quad \text{Equação 2}$$

Para determinar os valores do “ $x_i$ ” e do “ $x_f$ ”, foi utilizada uma fração em massa para calcular a porcentagem de cada substância na mistura. Sendo assim, os valores de porcentagem de “ $x_i$ ” e “ $x_f$ ” obtidos foram aproximadamente iguais a 29,98 e 70,02, respectivamente.

O valor de “ $c_{v_{mistura}}$ ” foi obtido como uma estimativa simples com o objetivo de proporcionar o início dos cálculos.

Portanto, ao utilizar todos os valores já citados na fórmula da equação 2, o resultado obtido para o valor do calor específico da mistura foi aproximadamente igual a  $3,97 \cdot 10^3 \frac{J}{Kg.K}$ .

Após a realização desses cálculos, é necessário aplicar os valores obtidos em uma equação da primeira lei da termodinâmica para calcular o valor do calor necessário para o aquecimento dessa mistura, considerando que a mistura está em temperatura ambiente, de 25°C ou 298,15K, e que a temperatura máxima atingida no aquecimento será de 100°C ou de 373,15K.

Assim, a equação utilizada para esses cálculos é demonstrada na Equação 3:

$$Q = mc_{v_{mistura}}(T_s - T_e) \quad \text{Equação 3}$$

As variáveis na Equação 3 representam os seguintes parâmetros:

- $Q$ : calor necessário para o aquecimento;
- $m$ : massa da mistura;
- $c_{v_{mistura}}$ : calor específico da mistura;
- $T_s$ : temperatura de aquecimento;
- $T_e$ : temperatura de entrada.

Ao realizar os cálculos, foi obtido o valor do calor necessário para aquecer a mistura nas condições citadas, representado por:

$$Q = 4,25 \cdot 10^5 J$$

Além disso, é preciso adicionar uma massa de células nas dornas de fermentação, denominada pé-de-cuba ou fermento, para garantir a produtividade fermentativa. Nesse caso, o pé-de-cuba a ser utilizado e que melhor se adequa as condições da minifábrica será o pé-de-cuba prensado, pois ele possui características desejáveis para a melhor qualidade da produção da cachaça artesanal.

Ao garantir que haja a adição do fermento para obter melhor produtividade fermentativa e que o mosto esteja bem preparado, dá-se início ao processo de fermentação com orientação para que o operador responsável administre esse processo com o objetivo de evitar a contaminação do mosto, analisando o próprio pH do mosto para identificar se houve contaminação ou não. Assim que o grau Brix do mosto atingir 0° e a medição do pH garantir que não houve contaminação, esse caldo será considerado vinho.

Como a cachaça é obtida a partir do álcool do vinho, esse vinho deve ser destilado para aumentar o teor alcoólico e propiciar uma boa graduação alcoólica para a cachaça, que será entre 38 e 48% do volume.

Para que o processo de destilação ocorra da melhor maneira possível na minifábrica, haverá a instalação de um sistema intermitente em que alambiques alimentarão com vinho uma caldeira, para que haja a emissão de vapores hidroalcoólicos que serão conduzidos até o condensador e, dessa maneira, resulte no destilado alcoólico.

Ao longo do processo de destilação é importante que as frações sejam selecionadas corretamente para manter o padrão de qualidade de cachaça, ou seja, a separação se dá apenas pelo coração.

Como nesse processo de destilação há um condensador, foi importante calcular o valor do calor retirado durante essa condensação. Para isso, considerando um trocador de calor

contracorrente, foram considerados alguns valores para os parâmetros de temperaturas e vazões para a realização dos cálculos de acordo com o fluido frio (água) e o fluido quente (etanol).

O fluido a ser condensado, ou seja, o fluido quente, é composto basicamente por etanol e não fermentáveis. Assim, os valores considerados para as propriedades do etanol (fluido quente) para a realização dos cálculos no trocador de calor utilizando a primeira lei da termodinâmica são demonstrados a seguir:

- $c_{v_{etanol}}: 2,84 \cdot 10^3 \frac{J}{Kg.K}$ ;
- $\dot{m}_{etanol}: 0,1 \frac{kg}{s}$ ;
- $T_{mudança\ de\ fase} = 343,15\ K$ ;
- $T_{entrada} = 353,15\ K$ ;
- $T_{saida} = 303,15\ K$ ;
- $L_v = 837360 \frac{J}{Kg}$ .

Ratificando que o “ $\dot{m}_{etanol}$ ” foi um valor estimado e considerado apenas para proporcionar a realização dos cálculos seguintes.

Assim, para calcular o calor total retirado durante a condensação, foi importante dividir o processo em três etapas: resfriamento até a temperatura de mudança de fase, mudança de fase e resfriamento final até a saída do etanol. Utilizando a primeira lei da termodinâmica, tem-se calor retirado na primeira etapa é calculado pela Equação 4:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_{etanol} c_{v_{etanol}} (T_{entrada} - T_{mudança\ de\ fase}) \quad \text{Equação 4}$$

Da mesma forma, o calor retirado na terceira etapa, é calculado pela Equação 5:

$$\dot{Q}_{s'} = \dot{m}_{etanol} c_{v_{etanol}} (T_{mudança\ de\ fase} - T_{saida}) \quad \text{Equação 5}$$

E, por fim, o calor retirado durante a mudança de fase é calculado pela Equação 6:

$$\dot{Q}_{MF} = \dot{m}_{etanol} L_v \quad \text{Equação 6}$$

Além dos cálculos para o etanol, é importante calcular o calor a ser retirado da outra parte da mistura, ou seja, dos não fermentáveis. Essa parte será considerada apenas água para que sejam obtidos os dados com os cálculos desse processo e, também, é necessário considerar que 60% da saída do produto final será de não fermentáveis, ou seja, de água, e 40% de etanol.

Para prosseguir com os cálculos, foi realizada uma estimativa do calor específico dos não fermentáveis, representado pela Equação 7:

$$c_{v_{não\ fermentáveis}} = c_{v_{água}} \quad \text{Equação 7}$$

Assim, o calor a ser retirado dos não fermentáveis deve ser calculado considerando uma vazão mássica proporcional adequada, que será de  $\dot{m}_{\text{não fermentáveis}} = 0,15 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ , e as mesmas temperaturas de entrada e saída consideradas para a parte do etanol, como é demonstrado na Equação 8.

$$\dot{Q}_{NF} = \dot{m}_{\text{não fermentáveis}} c_{v_{\text{não fermentáveis}}} (T_{\text{saída}} - T_{\text{entrada}}) \quad \text{Equação 8}$$

Então, o valor encontrado para calor a ser retirado da parte dos não fermentáveis foi igual a  $-3,15 \cdot 10^4 \frac{\text{J}}{\text{s}}$ .

Ao utilizar os parâmetros considerados para realizar os cálculos, é possível obter o valor total do calor retirado na condensação da mistura a partir da Equação 9:

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_S + \dot{Q}_{S'} + \dot{Q}_{MF} + \dot{Q}_{NF} \quad \text{Equação 9}$$

Então, o valor total do calor retirado no processo de condensação foi igual a  $6,64 \cdot 10^4 \frac{\text{J}}{\text{s}}$ .

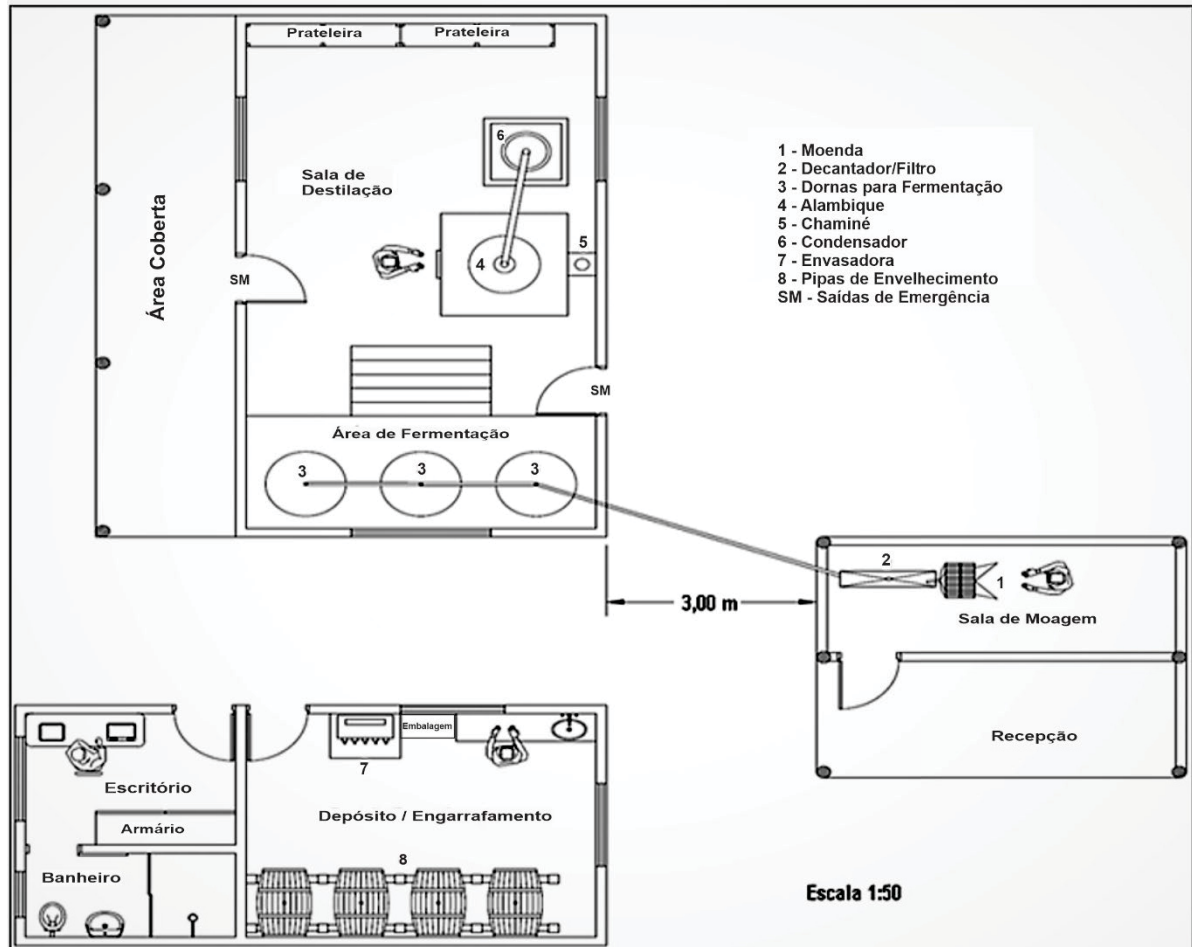
Utilizando a primeira lei da termodinâmica e considerando alguns parâmetros diferentes para o fluido frio (água), como o valor da vazão como  $\dot{m}_{\text{água}} = 0,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ , em função de uma bomba centrífuga convencional, e o seu calor específico, foi possível descobrir que o valor da sua temperatura de saída ( $T_Q$ ) foi de, aproximadamente, 337,68K ou 64,53°C.

Assim que é finalizado esse processo, será realizado o armazenamento dessa aguardente destilada em tonéis de madeira, em repouso e condições ambientes de temperatura, durante 8 a 12 meses, para que o período desse envelhecimento da cachaça garanta a melhor qualidade sensorial final do produto.

E, para finalizar o processo de fabricação de aguardente da minifábrica, haverá a filtração com a utilização de filtros de celulose para garantir a eliminação de partículas em suspensão e, assim, promover o brilho e a transparência da bebida. Sendo assim, será necessário somente o processo de engarrafamento em recipientes padrão, definidos de acordo com a viabilidade do mercado local, para que a cachaça possa ser distribuída e comercializada.

A Figura 10 apresenta a planta da mini fábrica e retrata muito bem todo o espaço alocado para cada processo necessário e como é organizada a infraestrutura do ambiente. Em adição ao layout da figura, também haverá uma área de envase junto a área de depósito, respeitando o espaço disponível, além de uma baia ao lado da área de envase para que as embalagens sejam armazenadas.





**Figura 10:** Layout e planta baixa com vista superior da Destilaria  
**Fonte:** Elaborado pelo Autor

Além disso, a Tabela 1 demonstra todos os principais resultados dos cálculos anteriores e que estão presentes nesse trabalho, com o objetivo de consolidar todo o assunto abordado e frisar a importância da termodinâmica para o projeto e toda estrutura do processo produtivo de uma mini fábrica de cachaça artesanal.

**Tabela 1** – Apresentação dos resultados obtidos

Variável	Valor
$Q$	$4,25 \cdot 10^5 J$
$\dot{Q}_s$	$2,84 \cdot 10^3 \frac{J}{s}$
$\dot{Q}_{s'}$	$1,14 \cdot 10^4 \frac{J}{s}$
$\dot{Q}_{MF}$	$8,37 \cdot 10^4 \frac{J}{s}$
$\dot{Q}_{NF}$	$-3,15 \cdot 10^4 \frac{J}{s}$
$T_Q$	337,68 K

#### 4 CONCLUSÕES

Os objetivos principais do projeto eram identificar e descrever os principais equipamentos necessários para a concepção e estruturação de uma destilaria de cachaça artesanal, já considerando a produção estimada de mil litros diários do produto final, e com o foco especial na etapa de fermentação do mosto para garantir a maior qualidade da cachaça a ser produzida, sendo que tais resultados foram alcançados com sucesso.

Além disso, foram necessários cálculos relacionados a área de transferência de calor, para determinar valores e detalhes importantes em algumas das etapas de produção, principalmente nas etapas de fermentação do mosto e destilação.

Para desenvolver um projeto maior, mais complexo e completo de uma mini fábrica de cachaça artesanal, torna-se necessário a realização de estudos e cálculos mais específicos e relacionados a cada etapa do processo de fabricação, além de determinar toda linha de equipamentos e estimar o capital inicial de investimento no projeto.

Assim, outros trabalhos podem ser desenvolvidos a partir desse, com o intuito de propor melhorias no processo produtivo e buscar a expansão da capacidade de produção ainda prezando pela maior qualidade do produto final.

## 5 BIBLIOGRAFIA

- ALCARDE, A. R. **Cachaça: ciência, tecnologia e arte**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2017.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **2013 ASHRAE Handbook - Fundamentals**. Atlanta: [s.n.], 2013.
- AOAC. **Official Methods of Analysis (Reference Tables)**. Washington, DC: AOAC, 1984.
- CHAVES *et al.* **Produção Artesanal de Cachaça de Qualidade** (Capacidade 3000 litros por dia). ResearchGate, jan. 2003.
- DE OLIVEIRA, B. L. *et al.* **Produção de Cachaça Industrial**. Curitiba. 2016.
- INMETRO. **Regulamento Técnico para fixação dos padrões de identidade e qualidade para aguardente de cana e para cachaça**. [S.l.]. 2004.
- MORAN, M. J. *et al.* **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010.
- OLIVEIRA, A. M. L. D. **O processo de produção de cachaça artesanal e sua importância**. [S.l.]: [s.n.], 2010.
- SCANAVINI, H. F. A. *et al.* **Cachaça Production in a Lab-Scale Alembic: Modeling and Computational Simulation**. Journal of Food Process Engineering 33, 2010. 226-252.
- STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar-condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.
- VIANA, A. R. **Cachaça de alambique**. Niterói: PESAGRO-RIO. Informe Técnico, 42, 2008.