

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**MARINA DE SOUZA DUTRA**

**DESTILAÇÃO DE MOSTOS DA FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA PARA**  
**PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO**

Uberlândia, MG

Novembro/2017

**MARINA DE SOUZA DUTRA**

**DESTILAÇÃO DE MOSTOS DA FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA PARA  
PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO**

Monografia submetida à Universidade Federal de  
Uberlândia como parte dos requisitos necessários para  
conclusão da disciplina de Trabalho de Conclusão de  
Curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Eloízio Júlio Ribeiro

Uberlândia, MG

Novembro/2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA *DESTILAÇÃO DE MOSTOS DA FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL HIDRATADO* DE MARINA DE SOUZA DUTRA, APRESENTADA À FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.

Uberlândia, 23 de novembro de 2017.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Eloízio Júlio Ribeiro

Orientador – FEQUI/UFU

---

Profa. Dra. Larissa Nayhara Soares Santana Falleiros

FEQUI/UFU

---

Me. Felipe Santos Moreira

FEQUI/UFU

Uberlândia, MG

Novembro/2017

*Esta monografia foi escrita de acordo com a Norma de Trabalhos Acadêmicos (NBR 14.724/2011), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).*

## AGRADECIMENTOS

*“A corrida terminou! Mas quem ganhou? É bobice, Maria da Graça, disputar uma corrida se a gente não irá saber quem venceu. Se tiveres de ir a algum lugar, não te preocupe a vaidade fatigante de ser a primeira a chegar. Se chegares sempre onde quiseres, ganhaste.”*

- Paulo Mendes Campos

E é com muita alegria que termino mais essa etapa da minha vida, e não poderia deixar de agradecer primeiramente a Deus, pois sem ele nada disso seria possível e aos meus dois grandes pilares que fizeram de tudo para que esse sonho se tornasse realidade, aos meus pais Carlos e Cléia o meu muito obrigada, faltam palavras para agradecer o amor incondicional e devoto de vocês.

Gostaria de agradecer minha tia Virgínia, que, como uma mãe, sempre acreditou e torceu por mim. E a toda minha família que durante esses anos me apoiaram de uma maneira surpreendente, muito obrigada, essa vitória também é de vocês.

Ao meu orientador, Prof. Eloízio Júlio Ribeiro, agradeço todo conhecimento que foi compartilhado com tanta didática e atenção. Obrigada por ter confiado em minha capacidade e por todo incentivo durante esse último ano.

Aos meus amigos de São Joaquim, que estão comigo desde quando engenharia química era só um sonho, obrigada pelo companheirismo de tantos anos. E aos meus amigos de Uberlândia que fizeram da faculdade os melhores anos possíveis, obrigada pelo carinho e pelo cuidado que tiveram comigo, não teria sido o mesmo sem vocês.

## RESUMO

Os biocombustíveis, como o etanol, vêm sendo empregados com o objetivo de substituir combustíveis de origem fóssil, trazendo benefícios ao meio ambiente não só pela preservação desses recursos, como também pela redução de gases que causam o efeito estufa. O etanol pode ser produzido a partir de matérias-primas amiláceas como o milho, celulósicas como o bagaço da cana e sacaríneas como a beterraba, sendo a cana-de-açúcar a mais utilizada no Brasil. O processo de produção deste combustível se dá, para a cana-de-açúcar, através da extração da sacarose, fermentação e destilação para a obtenção de etanol hidratado. O etanol hidratado possui cerca de 95,1 a 96% de etanol e de 4 a 4,9% de água. É muito consumido no Brasil como combustível em automóveis, principalmente em decorrência do menor custo, se comparado com a gasolina. As indústrias sucroalcooleiras vêm crescendo muito nos últimos anos, buscando a otimização dos processos produtivos para a obtenção de um produto de melhor qualidade. O processo de produção do etanol hidratado é constituído por diversas etapas, o presente trabalho visa fazer uma revisão bibliográfica sobre todas as etapas para produção deste etanol, desde a recepção da cana-de-açúcar até a destilação para produção do etanol, assim como apresentar dados sobre o mercado e produção do combustível no país.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biocombustível. Cana-de-açúcar. Destilação. Etanol Hidratado.

## ABSTRACT

Biofuels, such as ethanol, have been used to replace fossil fuels, bringing benefits to the environment not only for the preservation of these resources, but also for the reduction of gases that cause the greenhouse effect. Ethanol can be produced from amylaceous raw materials such as corn, cellulose such as sugarcane bagasse and saccharines such as sugar beet, with sugarcane being the most widely used in Brazil. The process of producing this fuel is given for sugar cane through the extraction of sucrose, fermentation and distillation to obtain hydrous ethanol. The hydrated ethanol has about 95.1 to 96% ethanol and 4 to 4.9% water. It is much consumed in Brazil as a fuel in automobiles, mainly due to the lower cost, compared to gasoline. The sugar and alcohol industries have been growing a lot in recent years, seeking to optimize the production processes to obtain a better quality product. The process of production of hydrated ethanol consists of several stages, the present work aims to make a bibliographical review on all stages for the production of ethanol, from the reception of sugarcane to distillation for the production of ethanol, as well as to present data on the market and fuel production in the country.

**KEY WORDS:** Biofuel. Sugar cane. Distillation. Hydrous Ethanol.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	9
1.2 Características do etanol .....	9
1.3. Breve história do álcool no Brasil .....	11
<b>2. MERCADO</b> .....	14
<b>3. PROCESSO PRODUTIVO</b> .....	17
3.1 Recepção e preparação da matéria-prima .....	19
3.2 Extração do caldo .....	20
3.3 Tratamento do caldo .....	21
3.4 Fermentação.....	21
<b>4. DESTILAÇÃO</b> .....	25
4.1 Princípios da Destilação: Equilíbrio Líquido-Vapor .....	25
4.2 Colunas de Destilação .....	28
4.3 Destilação alcoólica .....	30
4.4 Produção de Álcool Hidratado .....	32
4.5 Produção de Álcool Anidro.....	36
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	37
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

Etanol, álcool ou álcool etílico são palavras que se referem à mesma substância: um composto orgânico de fórmula  $C_2H_6O$ . Tanto o álcool combustível, como bebidas alcoólicas, produtos de limpeza, tintas e qualquer outro produto que contenha o composto utiliza o mesmo álcool, obtido por fermentação do açúcar ou síntese em laboratório.

Apesar de estar presente em diversos produtos do cotidiano, o etanol é mais utilizado, atualmente, como combustível em sua forma pura ou misturado à gasolina. O etanol comum vendido nos postos é o álcool etílico hidratado, uma mistura com cerca de 96% de etanol e o restante de água. Já o etanol misturado à gasolina é o álcool anidro, um tipo de etanol que possui pelo menos 99,6% de álcool puro. Na gasolina brasileira a proporção de etanol misturado ao combustível varia de 20% e 25%, de acordo com determinação do governo.

Por ser obtido de vegetais, o etanol é considerado um combustível renovável e, também, sustentável, pois grande parte do gás carbônico lançado na atmosfera em sua produção é absorvido pela própria cana-de-açúcar durante a fotossíntese. Calcula-se que o etanol reduz em 89% a emissão de gases de efeito estufa se comparado à gasolina. Além disso, ele lança menos gases poluentes em comparação com os combustíveis derivados do petróleo, o que o torna um dos mais viáveis ecologicamente.

Embora seja orgânico, o etanol não é encontrado puro na natureza e precisa ser fabricado. Existem muitos processos complexos para a obtenção dessa substância, porém, o mais difundido é a fermentação de açúcares de plantas ricas em açúcar ou amido, como cana-de-açúcar, milho, beterraba e sorgo, sendo a cana-de-açúcar a mais simples e produtiva. Dando uma grande vantagem ao Brasil, visto ser esse o principal produto de extração de etanol no país.

### 1.2 Características do etanol

O Instituto do Álcool e Açúcar através da resolução 01/77, classificou o álcool em três tipos:

- álcool refinado industrial (para indústria química);
- álcool anidro (para misturar a gasolina);
- álcool combustível (automobilístico) (Souza, 2006);

As características básicas do etanol como combustível, podem ser: anidro, que funciona como excelente aditivo melhorando inclusive os índices de octanagem da gasolina e hidratado, possui 5% de água e somente pode ser utilizado como combustível puro.

O álcool etílico ou etanol pode ser de origem renovável ou derivado do petróleo, porém em ambos os casos, devem atender, as especificações do Conselho Nacional do Petróleo conforme Tabela 1.

**Tabela 1** -Especificação do álcool etílico segundo o Conselho Nacional do Petróleo

Características	Unidade	AEAC	AEHC	Método
Acidez total (em ác. Acético)	mg/l	Máx.30	Máx.30	MB-2606
Aparência		(1)	(1)	
Condutividade elétrica	ms/m	500 máx.	500 máx.	MB-2788
Ions Cloreto (Cl)	mg/kg	-	1 máx.	MB-3055/56
Sulfato (SO)	mg/kg	-	4 máx.	MB-3055
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	Máx 791.5	809,3 + 1,7	MB-1533
Massa específica a 20°C com até 30 ml de gasolina	kg/m <sup>3</sup>	-	808,0 + 3,0	MB-1533
Matérias não voláteis a 105°C	mg/l	Máx.30	Máx.30	MB-2123
Metais: Cobre (Cu)	mg/kg	0,07 máx.	-	MB-3054
Ferro (Fe)	mg/kg	-	5 máx.	MB-3422
Sódio (Na)	mg/kg	-	2 máx.	MB-2787
Potencial hidrogeniônico	pH	-	7,0 + 1,0	MB-3053
Resíduo de evaporação	mg/l	-	Máx. 50	MB-2053
Teor alcoólico	°INPM	Min.99,30	93,90	MB-1533
Teor de álcool com até 30 ml/l de gasolina	°INPM	-	92,6 a 94,7	MB-1533
Teor de gasolina	mg/l	-	Máx.30	(4)

**Fonte:** ANP, 2002

AEAC= Álcool etílico anidro combustível para uso em mistura com gasolina

AEHC= Álcool etílico hidratado combustível para uso direto como combustível

(1) Líquido isento de material em suspensão

- (2) Especificação somente a nível de produção
- (3) Especificação somente a nível de distribuição
- (4) Portaria CNP/DIRAB N°209/81, devendo o teor de gasolina ser calculado pela fórmula  $2 \cdot (\text{vol HC, ml}) + 1 = \% \text{ gasolina}$

O álcool etílico é um derivado dos hidrocarbonetos, diferindo destes por possuir na estrutura molecular o grupo – OH, altamente polar. Suas moléculas encontram-se ligadas pelos mesmos mecanismos que unem as moléculas da água. Por isso é possível ligar-se as três moléculas. Embora com poder calorífico inferior a gasolina o álcool tem características que permitem excelente desempenho aos motores, entre as quais citam-se:

- Larga faixa de inflamabilidade;
- Grande poder antidetonante;
- Um elevado calor latente de vaporização;
- Densidade superior à da gasolina;
- Baixo ponto de fulgor, assim como a gasolina.

Considerando a mistura álcool-gasolina o principal ponto negativo é a baixa tolerância à água já que uma pequena quantidade acima do tolerável acarretará em separação de fases, por isso usa-se álcool anidro para misturar a gasolina. (Souza, 2006)

### 1.3. Breve história do álcool no Brasil

A história do etanol no Brasil remonta à época das capitânicas, quando se produzia aguardente a partir de resíduos da produção do açúcar. No final do século XIX teve início a produção industrial de álcool etílico a partir do melão da indústria açucareira, ampliando sua capacidade de produção, porém naquela época o álcool produzido no Brasil era único e exclusivamente para ser usado em bebidas destiladas, particularmente na cachaça.

Desde 1925, os brasileiros conheciam a possibilidade da utilização do álcool etílico como combustível. Nessa época, porém, o preço da gasolina desencorajava os esforços em produzir um combustível novo no Brasil, não havendo, assim, interesse no aperfeiçoamento das pesquisas com o álcool. No entanto, já na década de vinte, existiam no Brasil veículos movidos a combustível composto de 75% de álcool e 25% de éter, isso aconteceu durante a Segunda Guerra Mundial, quando o álcool ajudou o país a conviver com a escassez de gasolina (Barros, 2007).

Em 1973, o preço do petróleo havia saltado de US\$2,91 para US\$12,45, um aumento de 428%, em resposta a esse primeiro choque do petróleo o governo brasileiro cria o Programa Nacional do Alcool (Decreto nº 76.593, de 14 de novembro de 1975, regulamentado em 1975 e em 1979 – Decreto nº 83.700, de 05 de julho de 1979). O Proálcool, como foi popularmente batizado, visava o desenvolvimento das técnicas e aperfeiçoamento dos insumos para a produção de álcool etílico. A base do programa estava na expansão da oferta: seria incentivada pela expansão da oferta de matérias-primas, com especial ênfase no aumento da produção agrícola, da modernização e ampliação das destilarias existentes e da instalação de novas unidades produtoras, anexas a usinas ou autônomas, e de unidades armazenadoras.

Hoje em dia o Brasil é referência internacional em tecnologia sucroalcooleira, com seu clima favorável e terras férteis garantindo elevado teor de sacarose da cana, o baixo custo da terra e da mão-de-obra, a elevada produtividade e sua flexibilidade de destino da cana, para álcool ou para açúcar, podendo maximizar receitas fizeram do país líder mundial na produção de cana-de-açúcar e de seus derivados. Em termos regionais, o país apresenta dois períodos distintos de safra: de setembro a março no Norte-Nordeste, e de abril a novembro no Centro-Sul produzindo, assim, etanol durante praticamente todo ano. Tabela 2 apresenta a moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol safra 2016/2017.

**Tabela 2:** Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol – safra 2016/2017

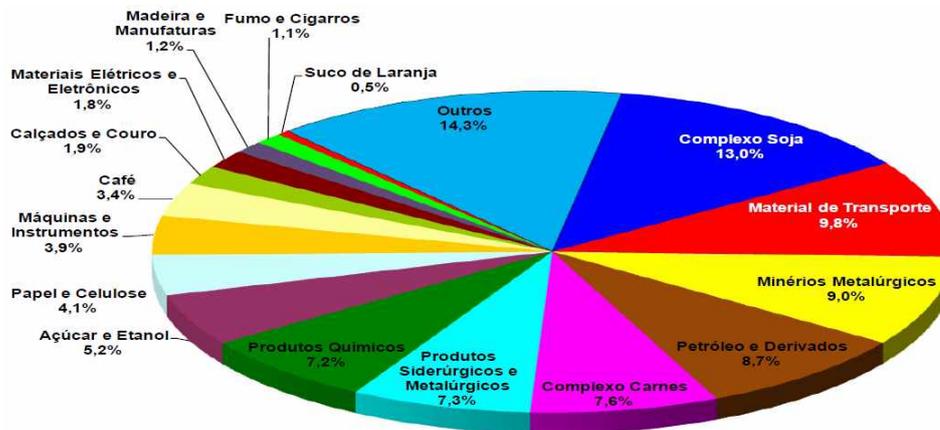
<b>Estados</b>	<b>Cana-de-açúcar mil toneladas</b>	<b>Açúcar mil toneladas</b>	<b>Etanol Anidro (mil m<sup>3</sup>)</b>	<b>Etanol Hidratado (mil m<sup>3</sup>)</b>	<b>Total</b>
Espírito Santo	1.351	64	51	9	60
Goiás	67.630	2.102	1.313	3.072	4.384
Mato Grosso	16.343	398	524	696	1.221
Mato Grosso do Sul	50.292	1.735	807	1.902	2.709
Minas Gerais	63.516	3.993	1.193	1.448	2.641
Paraná	40.417	3.060	616	739	1.355
Rio de Janeiro	1.553	29	0	82	82
Rio Grande do Sul	46	0	0	3	3
Santa Catarina	0	0	0	0	0
São Paulo	365.990	24.248	6.151	7.046	13.197
<b>Região Centro-Sul</b>	<b>607.137</b>	<b>35.628</b>	<b>10.655</b>	<b>14.996</b>	<b>25.651</b>
<b>Brasil</b>	<b>651.841</b>	<b>38.734</b>	<b>11.589</b>	<b>15.665</b>	<b>27.254</b>

Fonte: ÚNICA, SECEX, 2017

## 2. MERCADO

O Brasil já possui um bom mercado interno e externo de etanol, as exportações de açúcar e etanol representam 5,2% das exportações brasileira, Gráfico 1, mas com as inovações adotadas pelas usinas nas áreas tecnológicas e organizacionais; como a automatização do processo, a aquisição de novas máquinas agrícolas, o investimento em pesquisas para aumentar a produtividade da cana, a fusão de empresas e a profissionalização administrativa, tem proporcionado uma maior competitividade internacional colocando o Brasil em segundo lugar entre os maiores produtores de etanol. (FREITAS, 2011, p. 5).

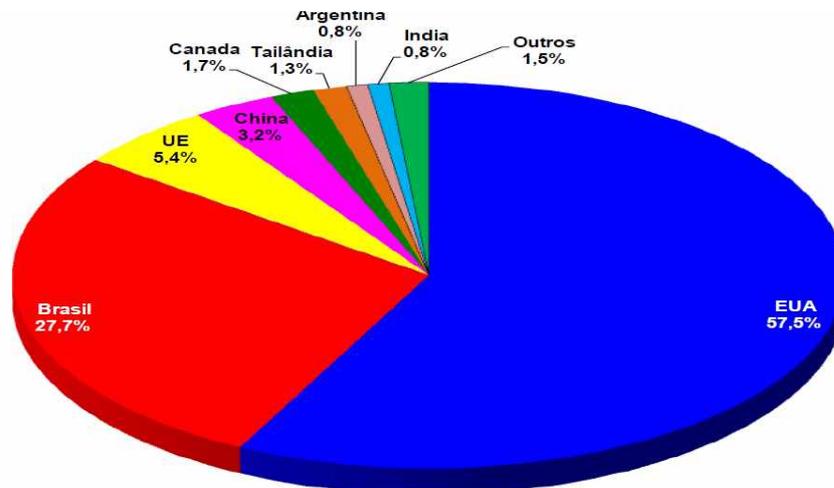
**Gráfico 1:** Pauta de exportações brasileiras



Fonte: SECEX, Bradesco

Fonte: SECEX, Bradesco, 2015

**Gráfico 2:** Maiores produtores de etanol



Fonte: RFA, Bradesco

Fonte: RFA, Bradesco, 2015

O caminho utilizado tanto pelo governo quanto pelo setor empresarial para a entrada do Brasil no comércio mundial de etanol tem sido a conquista de novos mercados através da redução das barreiras comerciais (FREITAS, 2011, p. 6).

Abaixo apresento valores atualizados até 9/2018 de exportação anual (US\$ mil) por estado brasileiro.

**Tabela 3:** Exportação anual de etanol por estado

Estados	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	2017/2018
SÃO PAULO	1.458.900	774.817	920.620	711.778	437.425
MINAS GERAIS	43.100	42.973	42.274	19.101	10.167
PARANÁ	88.468	38.744	4.668	97	1.663
ALAGOAS	13.660	11.265	8.970	4	3.949
GOIÁS	21.039	1.275	5.095	1.791	1.644
PARAÍBA	5.828	5.394	9.960	0	0
MATO GROSSO	14.535	0	0	0	0
MATO GROSSO DO SUL	11.236	0	2.319	0	0
ESPÍRITO SANTO	0	0	5.862	0	0
TOCANTINS	5.559	0	0	0	0
RIO DE JANEIRO	3.665	18	33	15	0
PERNAMBUCO	264	291	927	115	0
RIO GRANDE DO SUL	102	107	475	57	0
SANTA CATARINA	0	0	0	1	3
<b>CENTRO-SUL</b>	<b>1.641.045</b>	<b>857.937</b>	<b>981.406</b>	<b>732.861</b>	<b>450.903</b>
<b>NORTE-NORDESTE</b>	<b>25.310</b>	<b>16.950</b>	<b>19.857</b>	<b>120</b>	<b>3.949</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1.666.355</b>	<b>874.887</b>	<b>1.001.263</b>	<b>732.981</b>	<b>454.852</b>

**Fonte:** ÚNICA, SECEX, 2017

No mercado interno também há perspectivas de crescimento com o aumento nas vendas de carros flexíveis, 6,32 milhões de unidades em 2010, e a adição de 25% de álcool anidro na gasolina (FREITAS, 2011, p. 6), como podemos notar na Tabela 4 que apresenta o consumo de etanol hidratado na região centro-sul.

**Tabela 4:** Consumo de etanol hidratado (litros) na região Centro-Sul.

<b>Mês</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Janeiro	801.879.837	1.015.486.990	1.158.932.456	1.093.475.307	813.045.568
Fevereiro	813.153.864	982.474.377	1.146.652.957	1.047.380.340	803.414.853
Março	816.224.950	885.512.054	1.313.095.576	1.046.367.748	940.235.923
Abril	814.726.183	924.845.416	1.368.871.935	1.081.604.165	921.155.070
Mai	808.342.730	921.317.986	1.308.879.703	1.232.547.743	973.792.616
Junho	844.190.877	885.896.008	1.357.051.435	1.172.700.788	973.214.855
Julho	894.807.619	945.686.365	1.417.261.938	1.226.469.218	971.680.698
Agosto	953.743.138	993.452.314	1.445.587.904	1.262.314.963	1.075.870.837
Setembro	952.271.965	1.030.873.658	1.496.458.690	1.264.905.160	0
Outubro	1.054.310.832	1.133.138.963	1.585.306.582	1.118.479.012	0
Novembro	1.036.199.002	1.086.688.718	1.275.300.028	931.033.667	0
Dezembro	1.119.626.791	1.281.021.669	1.399.758.917	1.055.239.454	0
<b>Total</b>	<b>10.909.477.788</b>	<b>12.086.394.518</b>	<b>16.273.158.121</b>	<b>13.532.517.565</b>	<b>7.472.410.420</b>

Fonte: ÚNICA, SECEX,2017

Outro fator que pode contribuir com o crescimento do mercado consumidor de etanol é o preço mais satisfatório em relação a outros combustíveis (FREITAS, 2011, p. 8), como podemos observar na Tabela 5 abaixo com preços atualizados até abril de 2017 de etanol para o estado de Minas Gerais.

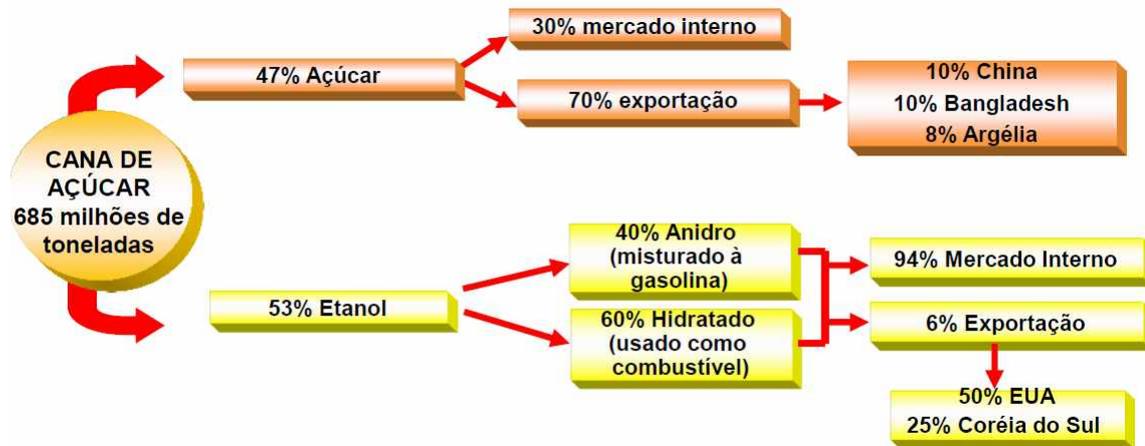
**Tabela 5:** Preço do combustível ao consumidor (R\$/L)

<b>Mês</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
Janeiro	2,20	2,78	2,95
Fevereiro	2,36	2,91	2,94
Março	2,37	2,96	2,81
Abril	2,28	2,82	2,72
Mai	2,23	2,51	2,69
Junho	2,23	2,52	2,58
Julho	2,19	2,52	2,58
Agosto	2,15	2,55	2,68
Setembro	2,06	2,53	
Outubro	2,40	2,72	
Novembro	2,62	2,86	
Dezembro	2,71	2,86	

Fonte: ÚNICA, SECEX,2017

O Brasil tem buscado a sustentabilidade ambiental, que em conjunto com os investimentos na ampliação e modernização do setor canavieiro são muito importantes. Em 2015, o Brasil produziu 685 milhões de toneladas de cana-de-açúcar dos quais 47% foram destinados para produção de açúcar e os outros 53% para produção de etanol como mostra o fluxograma abaixo.

**Figura 1:** Fluxograma de produção de açúcar e etanol



Fonte: CONAB E SECEX, Bradesco

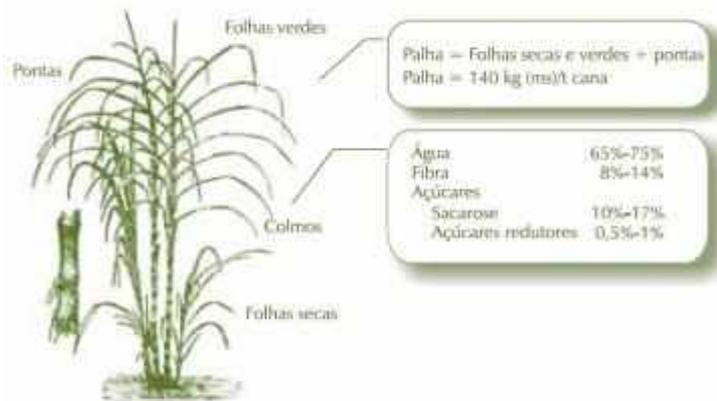
Fonte: CONAB, SECEX, 2016

### 3. PROCESSO PRODUTIVO

A produção de etanol por via fermentativa é a mais difundida no Brasil e nos EUA. A matéria-prima, utilizada na fermentação, pode ser açucarada; cana-de-açúcar, beterraba, melão, entre outros, amilácea; milho, arroz, mandioca, entre outros e celulósica; madeira, resíduos agrícolas entre outros. (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001; VASCONCELOS, 2012).

No Brasil, a matéria-prima principal utilizada é a cana-de-açúcar, uma planta semiperene da família das gramíneas que possui sacarose concentrada nos colmos na parte aérea da planta enquanto a palha da cana está em suas pontas e folhas, como mostra a Figura 2 abaixo. (BNDES; CGEE, 2008). Enquanto nos EUA, maior produtor mundial de etanol, a principal matéria-prima é o milho.

**Figura 2:** Estrutura da cana-de-açúcar

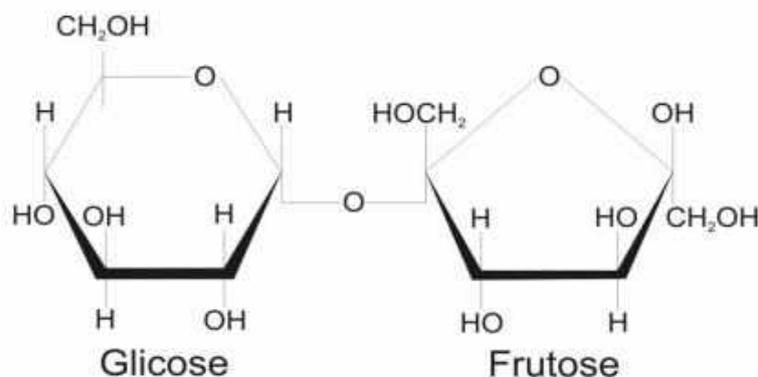


**Fonte:** BNDES, CGEE, 2008

O custo de produção de etanol, a partir da cana-de-açúcar no Brasil, é menor que o etanol de milho, com uma diferença de até 72% no custo (CRAGO *et al.*, 2010; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2007). Um fator que interfere no menor custo é o maior rendimento de etanol/hectare de plantação. A cana-de-açúcar apresenta um rendimento de 6471 L/ha enquanto o rendimento do milho é de 4182 L/ha (GOLDEMBERG, 2009). A sacarose é um açúcar que possui uma estrutura composta por glicose e frutose através de uma ligação glicosídica, formando um dissacarídeo.

O caldo da cana é utilizado na produção de etanol por apresentar a sacarose, Figura 3, um tipo de carboidrato (dissacarídeos) não diretamente fermentável. Para acontecer a fermentação, é necessário o processo de hidrólise, onde o dissacarídeo é separado em glicose e frutose. A composição da cana-de-açúcar depende da variedade, do estado de maturação, condições climáticas, entre outras. A cana-de-açúcar madura apresenta em média 12,5% sacarose (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001).

**Figura 3:** Estrutura da Sacarose



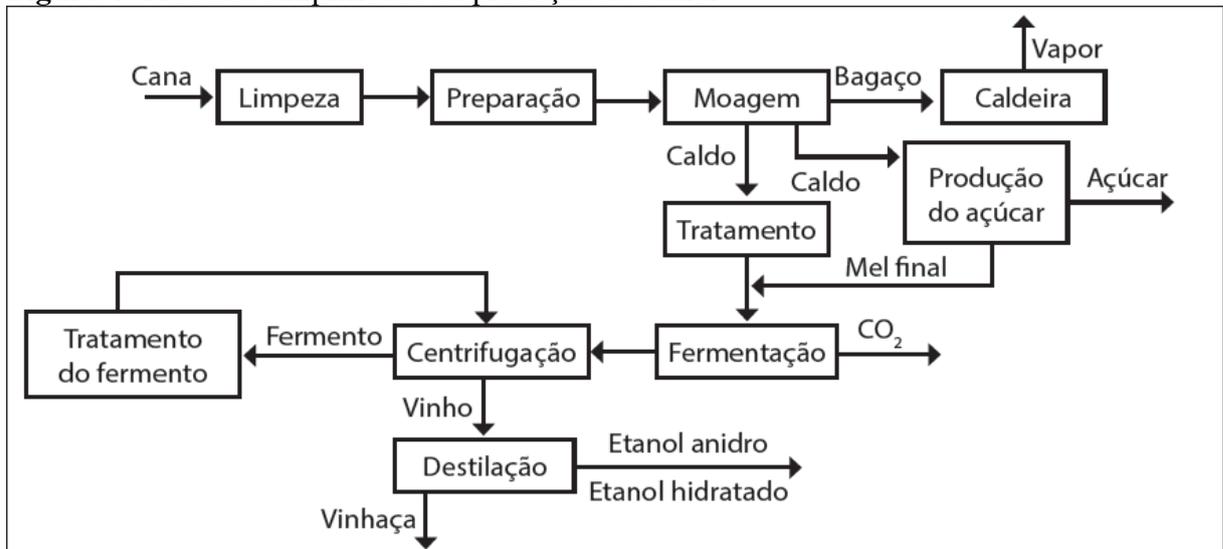
**Fonte:** AMABIS; MARTHO, 2004

No Brasil, existem dois tipos de indústria de produção de etanol. A destilaria autônoma, que produz exclusivamente etanol a partir do caldo da cana, e a destilaria anexa a

uma fábrica de açúcar. A anexa, além de utilizar o caldo proveniente da cana, pode utilizar produtos intermediários e subprodutos da produção de açúcar para compor o mosto de alimentação (BARRETO; COELHO, 2012). Mais de 62% das usinas brasileiras são do tipo anexa (BRASIL, 2014b).

O processo de produção do etanol inicia com a colheita da cana. Após a maturação, a cana é colhida manualmente (antecedida por queima) ou mecanicamente. Por ser um vegetal perecível, a cana precisa ser processada o mais rápido possível, dentro de um intervalo máximo de 24 horas entre o corte e sua utilização. O processo de fabricação de etanol pode ser dividido em etapas, um fluxograma simplificado do processo de produção de etanol, a partir da cana-de-açúcar está ilustrado na Figura 4.

**Figura 4:** Processo simplificado da produção de etanol



**Fonte:** ZANARDI; COSTA JUNIOR, 2015

### 3.1 Recepção e preparação da matéria-prima

Os caminhões carregados com canas inteiras (colheita manual) ou picada em toletes (colheita mecânica), que chegam, são pesados e a carga é amostrada. Essa etapa tem como objetivo conhecer a quantidade, qualidade da matéria-prima e realizar o pagamento de cana. A cana, então, passa por uma lavagem com água ou em um processo a seco para a remoção de impurezas e segue para a extração.

A extração eficiente do caldo requer uma boa preparação da cana. A preparação consiste em abrir as células da cana, extrair parte do caldo e transformá-la em uma massa com

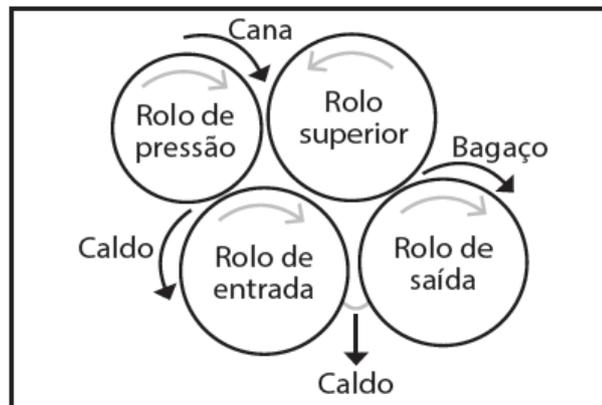
menor volume sem a redução da fibra a um tamanho tal que comprometa a alimentação da moenda (PAYNE, 1989).

A preparação pode ser realizada por equipamentos como o picador e o desfibrador. O picador é um equipamento composto por um nivelador e martelos que, ao girar com uma alta rotação, “quebra” e nivela a cana, reduzindo seu volume. O desfibrador é composto de martelos que esmaga a cana contra uma placa desfibrando-a e liberando caldo (PAYNE, 1989).

### 3.2 Extração do caldo

Após ser desfibrada, a cana segue por esteiras para o processo de extração. O mesmo tem por objetivo a separação do caldo e da fibra da cana. Normalmente, acontece em um conjunto de moendas, Figura 5, no qual o caldo é expelido a fibra por aplicações sucessivas de pressão, à medida que a cana passa entre pares de rolo (PAYNE, 1989).

**Figura 5:** Esquema de funcionamento moenda



**Fonte:** ZANARDI; COSTA JUNIOR, 2015

O processo de extração é composto por várias moendas, conhecido como terno. No primeiro terno, é possível obter de 50 a 70% de extração. O bagaço, ainda contendo caldo, é encaminhado por esteira para o segundo terno. Após duas compressões sofridas pelo bagaço, um pouco mais de caldo é extraído, e o bagaço segue para o próximo terno (DELGADO; CEZAR, 1977).

O bagaço que sai da última moenda ainda contém caldo, para aumentar a eficiência da extração de sacarose é realizado um sistema convencional de embebição que consiste em

umidificar o bagaço. Água quente é distribuída ao bagaço na esteira intermediária que alimenta o último terno. Após esse processo, é formado um caldo misto (convenientemente diluído) rico em açúcares redutor e sacarose que segue para o tratamento (PAYNE, 1989; LIMA; BASSO; AMORIM, 2001).

O bagaço resultante da extração é enviado à caldeira para ser utilizado como combustível na caldeira. O calor gerado aquece a água contida em tubulações, formando vapor superaquecido, o mesmo é, posteriormente, utilizado para movimentar turbina e gerar eletricidade. Ressalta-se que, normalmente, as usinas de etanol são autossuficientes em energia (PAYNE, 1989).

### 3.3 Tratamento do caldo

O caldo sai da extração com impurezas que precisam ser removidas. A primeira etapa consiste na remoção de sólidos, areia, bagacilhos, entre outros, por meio de peneiras. A segunda etapa é a decantação para a remoção de sólidos, não eliminados nas etapas anteriores e impurezas coloidais por coagulação ou floculação e, por último, é realizado o aquecimento.

Após o tratamento o caldo clarificado, também conhecido como mosto, torna-se mais limpo, fermenta melhor, espuma menos e suja menos as colunas de destilação. Após a clarificação, resfria-se o caldo e envia-se à dorna de fermentação (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001).

### 3.4 Fermentação

A fermentação alcoólica é o processo de conversão de açúcar em etanol e CO<sub>2</sub> por leveduras, em condições de anaerobiose. As leveduras são microrganismos heterotróficos, unicelulares, facultativos (apresentam metabolismo anaeróbico e aeróbico) e reproduzem-se por brotamento. Devido à importância econômica nos processos biotecnológicos, a levedura *Saccharomyces cerevisiae* é o microrganismo mais estudado e utilizado em escala industrial no Brasil (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001; VASCONCELOS, 2012).

A transformação do açúcar envolve doze reações em sequência ordenada, catalisada por uma enzima específica, que ocorrem no citoplasma celular (LIMA; BASSO; AMORIM,

2001). Em condição aeróbia, o carboidrato é transformado em biomassa, CO<sub>2</sub> e água, enquanto em anaerobiose a maior parte é convertido em etanol e CO<sub>2</sub>.

O processo de fermentação pode ser representado por duas equações principais em condições anaeróbias. A primeira etapa, representada pela equação 1, consiste na hidrólise da sacarose pela enzima invertase em duas moléculas fermentáveis: a glicose e a frutose, e, a segunda etapa, representada pela equação 2, é a reação de fermentação simplificada:



O balanço de massa teórico da equação 2 fornece um rendimento de 51,11% de etanol sobre a massa da glicose, porém se estima que 5% do açúcar metabolizado seja desviado para produtos secundários, como ácido acético, glicerol e óleo fúsel (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001).

Diversos fatores físicos, químicos e microbiológicos afetam o rendimento da fermentação. Um fator físico é a temperatura, à medida que a mesma aumenta, a velocidade de fermentação também aumenta, mas uma temperatura muito mais elevada inibi o crescimento das células, e a produção de etanol diminui significativamente (LIN *et al.*, 2012). A temperatura ótima de fermentação situa-se na faixa de 26-35°C (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001).

A agitação mecânica é uma operação importante na condução da fermentação etanólica industrial. Uma agitação adequada é a melhor forma de homogeneizar o meio e traz uma série de benefícios, tais como: menor tempo de fermentação, maior produtividade, maior viabilidade celular e proporciona contato eficiente entre o microrganismo e o substrato (VASCONCELOS, 2012).

A tolerância à acidez é uma característica importante para as leveduras industriais. A fermentação conduzida em meio ácidos resulta em maiores rendimentos de etanol e melhora o controle de contaminação bacteriana. A faixa mais adequada encontra-se entre os valores de pH iguais a 4 e 5 (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001; LIN *et al.*, 2012). Também é preciso fornecer nutrientes às leveduras para uma boa condução da fermentação, o meio precisa ter fonte de vitamina, nitrogênio, fósforo, iodo, ente outros (VASCONCELOS, 2012).

Outro fator é a inibição por concentração de substrato. Esse aumento pode ocasionar fermentações incompletas, com formação de subprodutos indesejáveis ou mesmo elevar muito

a concentração de etanol no meio fermentado (VASCONCELOS, 2012). Alta concentração de etanol no meio fermentado pode inibir a produção de etanol.

A fermentação ocorre em biorreatores, recipientes cilíndricos denominados dornas. No Brasil, utilizam-se dornas construídas de aço carbono, com altura uma vez e meia do diâmetro. O controle da temperatura faz-se por meio de trocadores de calor de placa (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001).

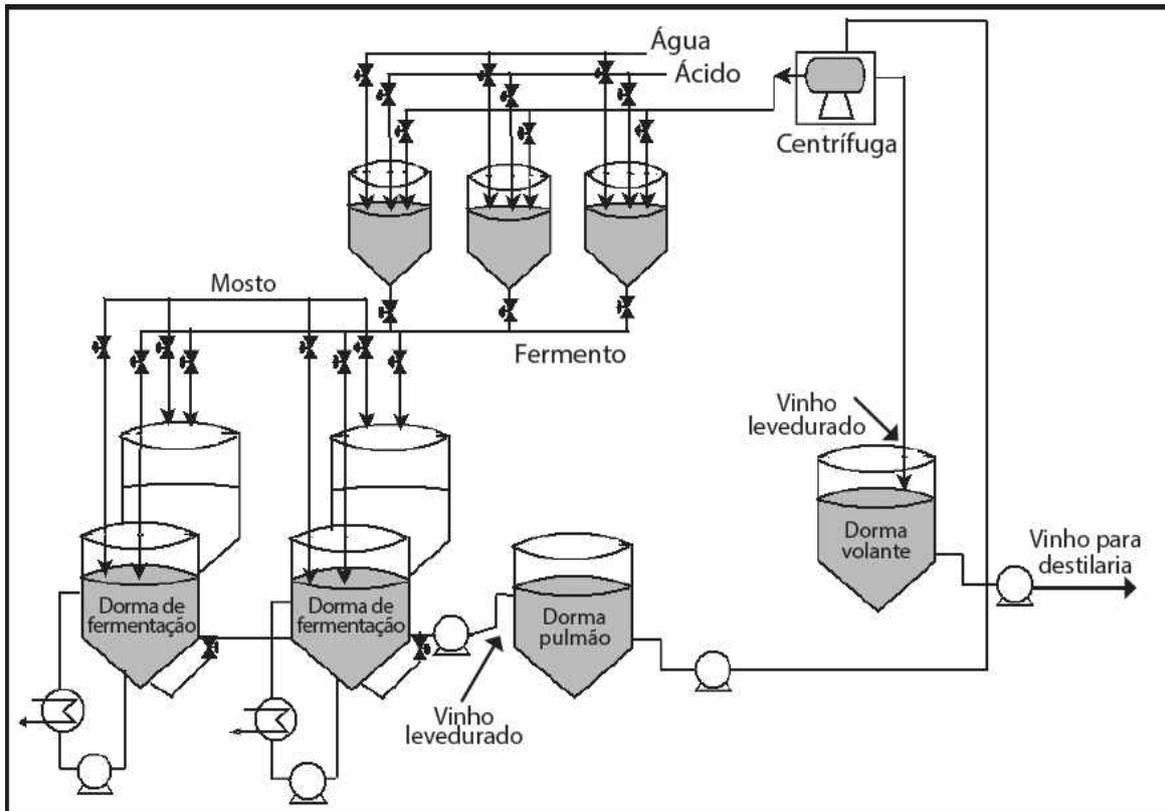
O processo de fermentação pode ser conduzido de quatro formas diferentes: descontínuo (batelada), descontínuo alimentado, semicontínuo ou contínuo (SCHMIDELL; FACCIOTTI, 2001).

Processo descontínuo: consiste em adicionar o inoculo e o mosto na dorna no início da fermentação. Terminada a fermentação, o mosto fermentado (vinho) é enviado para as operações unitárias necessárias para a recuperação do produto. O volume do reator é constante, a fermentação pode levar a baixos rendimentos e, também, o substrato adicionado de uma só vez no início da fermentação pode exercer efeitos de inibição. O processo em batelada possui menor risco de contaminação, e o reator pode ser utilizado para a fabricação de diversos produtos (CARVALHO; SATO, 2001a).

Processo descontínuo alimentado: um ou mais nutrientes (incluindo o substrato) são adicionados ao reator, durante a fermentação. Os nutrientes podem ser adicionados gradualmente ou continuamente. Após o enchimento da dorna, a fermentação ocorre como em um sistema em batelada convencional. É aplicado, principalmente, quando um dos substratos é inibitório ao processo (CARVALHO; SATO, 2001b; VASCONCELOS, 2012).

O processo *Melle-Boinot*, representado na Figura 6, é o mais utilizado nas destilarias no Brasil. Após o fim da fermentação, o mosto fermentado (vinho levedura) é enviado para uma dorna pulmão que alimenta a centrífuga que separa o mosto em duas partes. A primeira, é o vinho que é armazenado na dorna volante, para posterior utilização na destilaria e, a segunda, é uma suspensão concentrada de células, denominada leite ou fermento. A suspensão é encaminhada para as cubas, onde é diluída com água e tratada com ácido, após 3 horas, o fermento é utilizado em um novo ciclo de fermentação (VASCONCELOS, 2012).

**Figura 6:** Esquema de funcionamento do sistema Melle-Boinot



**Fonte:** ADAPTADO VASCONCELOS,2012

Processo contínuo: nesse processo a alimentação e a retirada do mosto fermentado se processam de modo contínuo, com o volume constante. O processo contínuo apresenta elevada produtividade, quando comparado ao descontínuo, pois não há tempo improdutivo no processo (FACCIOTTI, 2001).

Após ser fermentado, o mosto segue até a centrífuga (ou conjunto de centrífugas) para ocorrer a separação do vinho (mistura de água, etanol e produtos secundários) e fermento. O vinho fica armazenado na dorna volante até ser utilizado na destilaria, enquanto o fermento segue para as cubas, para as leveduras serem tratadas e retornarem ao processo. Normalmente, as dornas são fechadas com apenas uma abertura para a saída de CO<sub>2</sub> e possuem trocadores de calor tipo placa, acoplado para o controle da temperatura (VASCONCELOS, 2012).

No Brasil, setenta por cento (70%) das destilarias utilizam processo descontínuo alimentado, principalmente o *Melle-Boinot* e de 20 a 30% utilizam o processo contínuo alimentado, principalmente o *Melle-Boinot* e de 20 a 30% utilizam o processo contínuo alimentado (GODOY *et al.*, 2008 *apud* CAVALHEIRO; MONTEIRO, 2013; AMORIM *et al.*, 2010 *apud* CAVALHEIRO; MONTEIRO, 2013).

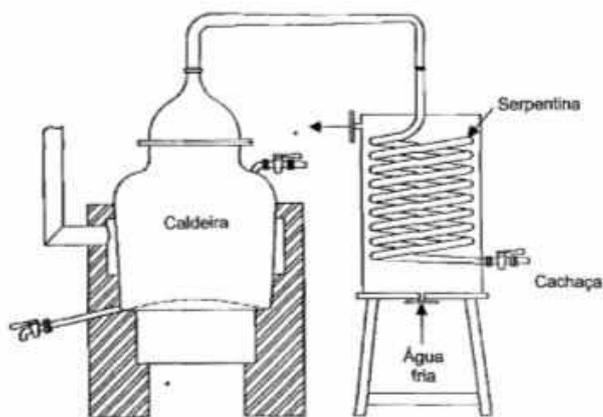
## 4. DESTILAÇÃO

A destilação é uma operação física unitária que visa a separação de componentes de uma mistura, de acordo com a volatilidade relativa dos componentes; o mais volátil desloca-se para fase vapor, enquanto o menos volátil permanece preferencialmente na fase líquida. Esta operação é realizada por meio da ebulição e condensação parciais da mistura que se quer separar e, ou, purificar.

A temperatura de ebulição é a temperatura em que uma substância passa do estado líquido ao estado gasoso. O valor dessa temperatura depende da pressão ambiente e é usado para caracterizar substâncias puras quando submetidas à destilação a pressão atmosférica.

Desde a Idade Média, há relatos de processos de destilação usando-se alambiques, Figura 7, principalmente, para a obtenção de bebidas alcoólicas a partir de um mosto fermentado. Este procedimento permitiu também aos químicos do passado, chamados de alquimistas, separarem e, ou, concentrarem várias substâncias: etanol, ácido acético, ácido cítrico e etc. Com o passar do tempo, a destilação foi subdividida, de acordo com sua aplicação. Hoje em dia, são conhecidas a destilação atmosférica, a vácuo, azeotrópica, extrativa e a fracionada.

**Figura 7:** Alambique



**Fonte:** Duarte-Coelho, 2008

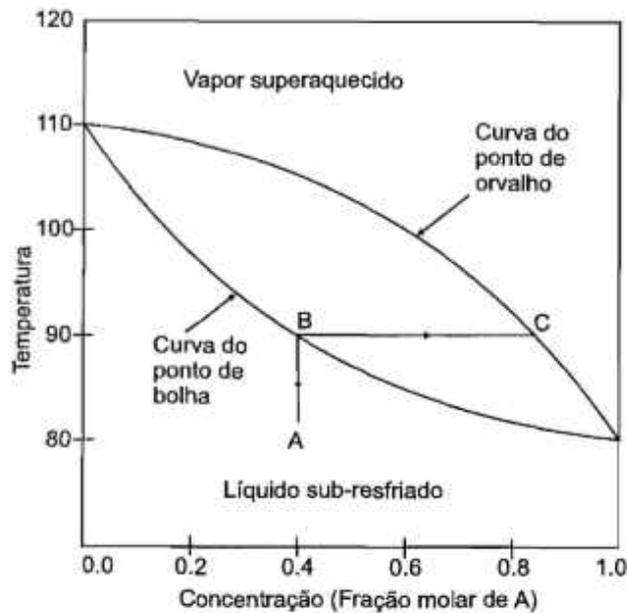
### 4.1 Princípios da Destilação: Equilíbrio Líquido-Vapor

Na destilação, os vapores produzidos são normalmente mais ricos nos componentes mais voláteis do que o líquido, o que possibilita a separação de frações enriquecidas nos

componentes desejados. O líquido e o vapor contêm, em geral, os mesmos componentes, mas em quantidades relativas diferentes.

A volatilidade relativa é a medida das diferenças em volatilidade entre dois componentes, ou seja, entre seus pontos de ebulição a pressão atmosférica. A curva de equilíbrio líquido-vapor (ELV), Figura 8, do componente mais volátil mostra-nos os pontos de bolha e os pontos de orvalho de uma mistura a pressão fixa. Nos sistemas ideais, o ponto de ebulição permanece constante. Quanto maior a volatilidade relativa de dois componentes, maior a facilidade de separação. A curva também indica uma mistura binária que, por possuir características uniformes de equilíbrio líquido-vapor, é relativamente fácil de separar.

**Figura 8:** Pontos de bolha e pontos de orvalho de uma mistura a pressão fixa.

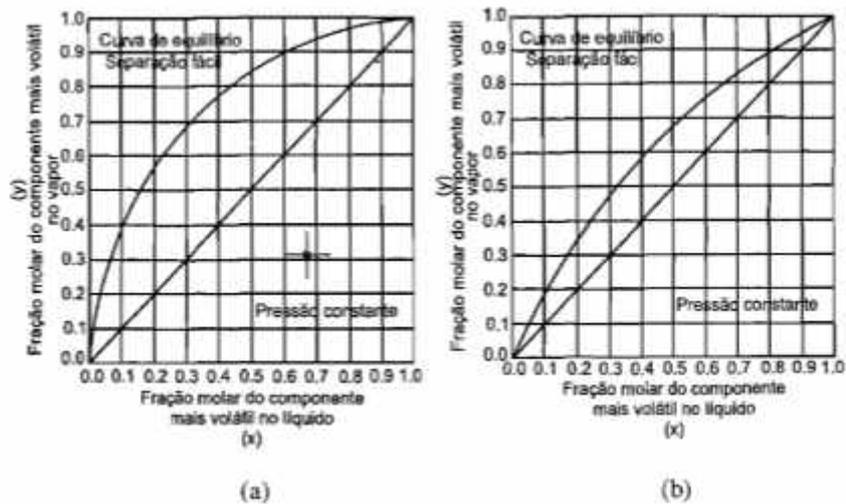


**Fonte:** Duarte-Coelho, 2008

Em um sistema binário sob pressão total constante, a análise do diagrama  $y$  (fração molar da fase gasosa) e  $x$  (fração molar da fase líquida) permite avaliar o grau de dificuldade para separar os componentes por destilação.

Quanto mais afastada da diagonal estiver a curva de equilíbrio, mais fácil será a separação por destilação. Na Figura 9 (a) a separação por destilação é mais fácil do que no caso da Figura 9 (b).

**Figura 9:** Curvas de Equilíbrio Líquido – Vapor de misturas binárias a uma pressão constante

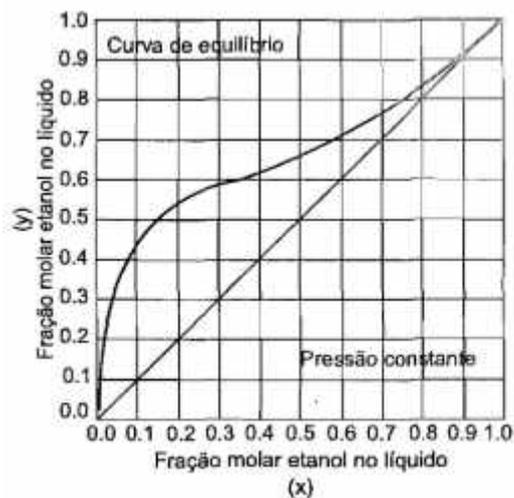


**Fonte:** Duarte-Coelho, 2008

Em misturas não ideais, como água-etanol, pode haver grandes diferenças entre as volatilidades em função da concentração dos componentes na mistura. Para a composições entre 5 a 50% em massa de etanol, a volatilidade relativa é muito maior do que 1, enquanto que, ao se avizinhar dos 95% em massa de etanol, a volatilidade relativa se aproxima de 1, até atingir este valor no ponto da curva chamado de ponto de azeotrópico.

Quando uma mistura líquida gera um vapor com a mesma composição, tem-se um azeótropo. As curvas de equilíbrio cruzam as linhas diagonais.

**Figura 10:** Curva de Equilíbrio Líquido-Vapor de misturas binárias, etanol-agua a uma pressão constante



**Fonte:** Duarte-Coelho, 2008

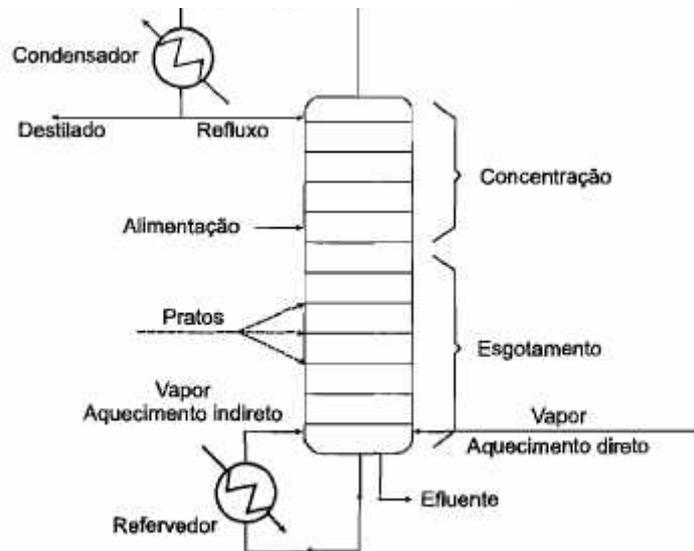
## 4.2 Colunas de Destilação

Industrialmente, a destilação é feita em equipamentos chamados de colunas, que podem ser de estágios (pratos) ou de contato (recheio), que acarretam o enriquecimento do vapor produzido e o esgotamento do líquido destilado (em relação ao componente mais volátil).

Em 1925, McCabe e Thiele desenvolveram um método gráfico para determinação do número ideal de pratos de uma coluna de destilação. Hoje em dia, usam-se métodos computacionais de simulação.

Na indústria alcooleira do Brasil, usam-se colunas de pratos instaladas paralelamente a certa distância. Existem colunas que possuem, em relação ao prato de alimentação, uma zona de concentração (acima) e uma zona de esgotamento (abaixo). O vapor, rico no componente mais volátil, ao sair do topo da coluna, é resfriado e condensado em condensadores. No fundo da coluna, entra o vapor de aquecimento e sai do líquido (efluente) quase isento do componente mais volátil, conforme visto na Figura 11.

**Figura 11:** Esquema de coluna



**Fonte:** Duarte-Coelho, 2008

Nas imagens abaixo estão representados os principais tipos de pratos de uma coluna: calotas, Figura 12, perfurados, Figura 13, e válvulas, Figura 14.

**Figura 12:** Prato com calota



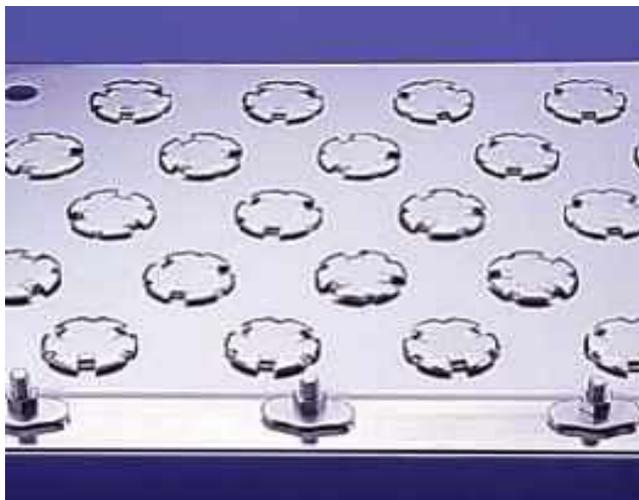
Fonte: JAEGER, 2008

**Figura 13:** Prato perfurado



Fonte: JAEGER, 2008

**Figura 14:** Prato com válvulas



Fonte: JAEGER, 2008

As colunas de destilação são complementadas por: trocadores de calor, condensadores, refulvedores, regeneradores, resfriados e instrumentos de controle de vazão, temperatura e pressão. A seguir, é descrito cada um deles.

- Condensadores: são responsáveis pela condensação dos vapores enriquecidos no topo, promovendo o refluxo do líquido à coluna e permitindo a retirada do destilado. Utilizam a água como líquido refrigerante.
- Refulvedores: são aquecedores do tipo indireto. O vapor de processo aquece o líquido do fundo da coluna, que é vaporizado e retorna para realizar o aquecimento do sistema. O vapor condensa e a água condensada é utilizada para a alimentação dos geradores de vapor (caldeiras).
- Regeneradores: recuperam energia do processo. Conforme as funções adquirem denominações especiais. São exemplos os dois tipos de trocadores de calor que aquecem o vinho até o ponto de ebulição usando energia térmica de fluidos do processo- o pré aquecedor de vinho (E), que aproveita o calor da flegma do topo da coluna de retificação (B) e os trocadores K, conjunto de quatro ou mais corpos, que recupera parcialmente e o calor da vinhaça (efluente da destilação do vinho).
- Resfriadores: servem para resfriar o produto final antes de ser estocado.
- Instrumentos de controle de vazão, temperatura e pressão: atualmente, há um nível elevado de instrumentação e automação nas plantas de etanol. São feitas as medições das vazões de vinho e produto final. As medições das temperaturas e pressões em determinados pratos orientam a operação e permitem a automação do processo.

#### **4.3 Destilação alcoólica**

O álcool etílico, tais como Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC), Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC), é uma substância obtida por fermentação do mosto e posterior destilação. O produto final, dependendo das propriedades e seus teores de impureza tem diversas aplicações nas indústrias de bebidas, farmacêuticas e afins, são obtidos através da concentração do vinho, denominado mosto, após o processo de fermentação.

O vinho que vem da fermentação possui, em sua composição, 7° a 10°GL (% em volume) de álcool, além de outros componentes de natureza líquida, sólida e gasosa. Entre os líquidos, além do álcool, encontram-se a água com teores de 89% a 93%, glicerol, álcoois homólogos superiores, furfural, aldeído acético, ácidos succínico e acético em quantidades bem menores. Já os sólidos são representados por bagacilhos, leveduras e bactérias, açúcares

não fermentáveis, sais minerais, matérias albuminóides e outros. Os gasosos, representados principalmente pelo CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>.

O álcool presente neste vinho é recuperado por destilação, processo que se utiliza dos diferentes pontos de ebulição das diversas substâncias voláteis presentes, separando-as. Na tabela abaixo observamos as propriedades químicas dos principais compostos envolvidos na Destilação Alcoólica, Tabela 6.

**Tabela 6:** Principais Compostos envolvidos na Destilação Alcoólica

<b>Classe Química</b>	<b>Composto</b>	<b>Peso molecular (kg/kmol)</b>	<b>T<sub>ebulição</sub> (°C)</b>	<b>P<sub>vapor</sub>, 100°C (mmHg)</b>
<b>Água</b>	Água	18,02	100	760
<b>Álcoois</b>	Metanol	32,04	64,7	2610
	Etanol	46,07	78,4	1694
	Propanol	60,10	97,2	846
	Isopropanol	60,10	83,4	1482
	Butanol	74,12	117,5	389
	Isobutanol	74,12	107,7	565
	Amílico	88,15	137,9	185
	Isoamílico	88,15	130,9	237
	<b>Aldeídos</b>	Acetaldeído	44,05	20,8
Butiraldeído		72,11	74,9	1539
Crotonaldeído		70,09	104,6	-
<b>Ácidos</b>	Acético	60,05	118,1	427
	Propiônico	74,08	140,9	182
	Caprílico	144,21	236,9	1,7
<b>Cetona</b>	Acetona	58,08	56,2	2806
<b>Ésteres</b>	Acetato de Etila	88,11	77,1	1533
	Caprilato de Etila	172,26	207,1	-
<b>Éter</b>	Acetal	118,17	102,9	-
<b>Hidrocarboneto</b>	Cicloexano	84,16		1303
<b>Diol</b>	Monoetilenoglicol (MEG)	62,07	197,4	16

**Fonte:** ANP, 2002

Os principais produtos alcoólicos industriais são os de uso combustível; AEHC e o AEAC (como aditivo da gasolina), que possuem padrões de qualidade bem estabelecidos,

Tabela 7.

**Tabela 7:** Padrões de qualidade AEHC e AEAC

<b>Propriedade</b>	<b>Hidratado (AEHC)</b>	<b>Anidro (AEAC)</b>
<b>Teor alcoólico</b>	92,6 a 93,8° INPM (% massa)	≥ 99,3° INPM (% massa)
<b>Densidade a 20°C</b>	807,6 a 811,0 Kg/m <sup>3</sup>	≤ 791,5 Kg/m <sup>3</sup>
<b>pH</b>	6.0 a 8.0	-
<b>Acidez total, como acidez acética</b>	≤ 30 mg/L	≤ 30 mg/L
<b>Condutividade elétrica</b>	≤ 500 μS/m	≤ 500 μS/m
<b>Teor de hidrocarbonetos</b>	≤ 3.0% em volume	≤ 3.0% em volume

Fonte: ANP, 2002

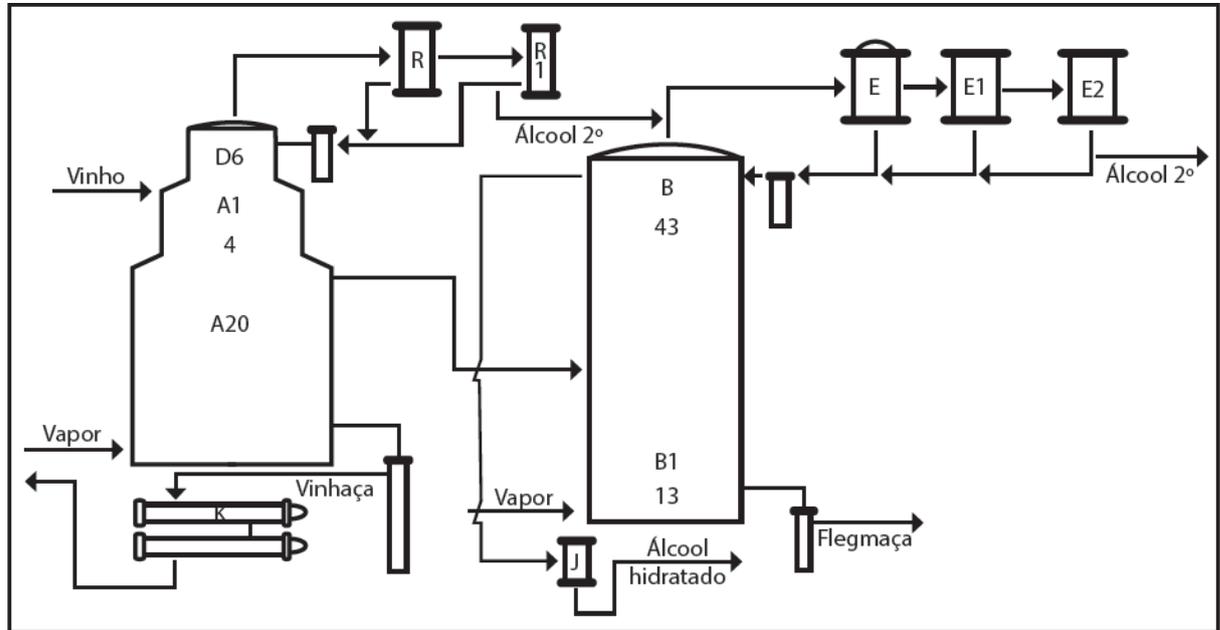
#### 4.4 Produção de Álcool Hidratado

O vinho proveniente da fermentação apresenta de 88 a 93% de água, 12 a 7% de etanol e outros álcoois como ésteres, ácidos orgânicos e impurezas sólidas em pequenas proporções (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001). Desse material impuro, o etanol é separado em grau de pureza e concentrações variáveis por destilação, que é uma operação física unitária que visa a separação de componentes de uma mistura de acordo com a volatilidade dos componentes.

A destilação ocorre nas colunas de destilação, as colunas são constituídas de gomos cilíndricos superpostos, contendo separações transversais (pratos ou bandejas) entre si. O aquecimento das colunas se faz pela base, por meio de injeção de vapor ou serpentinas, e as bandejas são aquecidas pelo calor dos vapores do vinho que ascendem na coluna (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001).

Existem duas qualidades de etanol: o hidratado com concentração de etanol de 92,6 a 93,8 ° INPM (porcentagem em massa de etanol na mistura) e o etanol anidro com concentração mínima de 99,3 ° INPM (BARRETO; COELHO, 2012). Na Figura 15 podemos observar uma versão simplificada do esquema de destilação para produção de álcool hidratado.

**Figura 15:** Esquema de destilação para obtenção do etanol hidratado

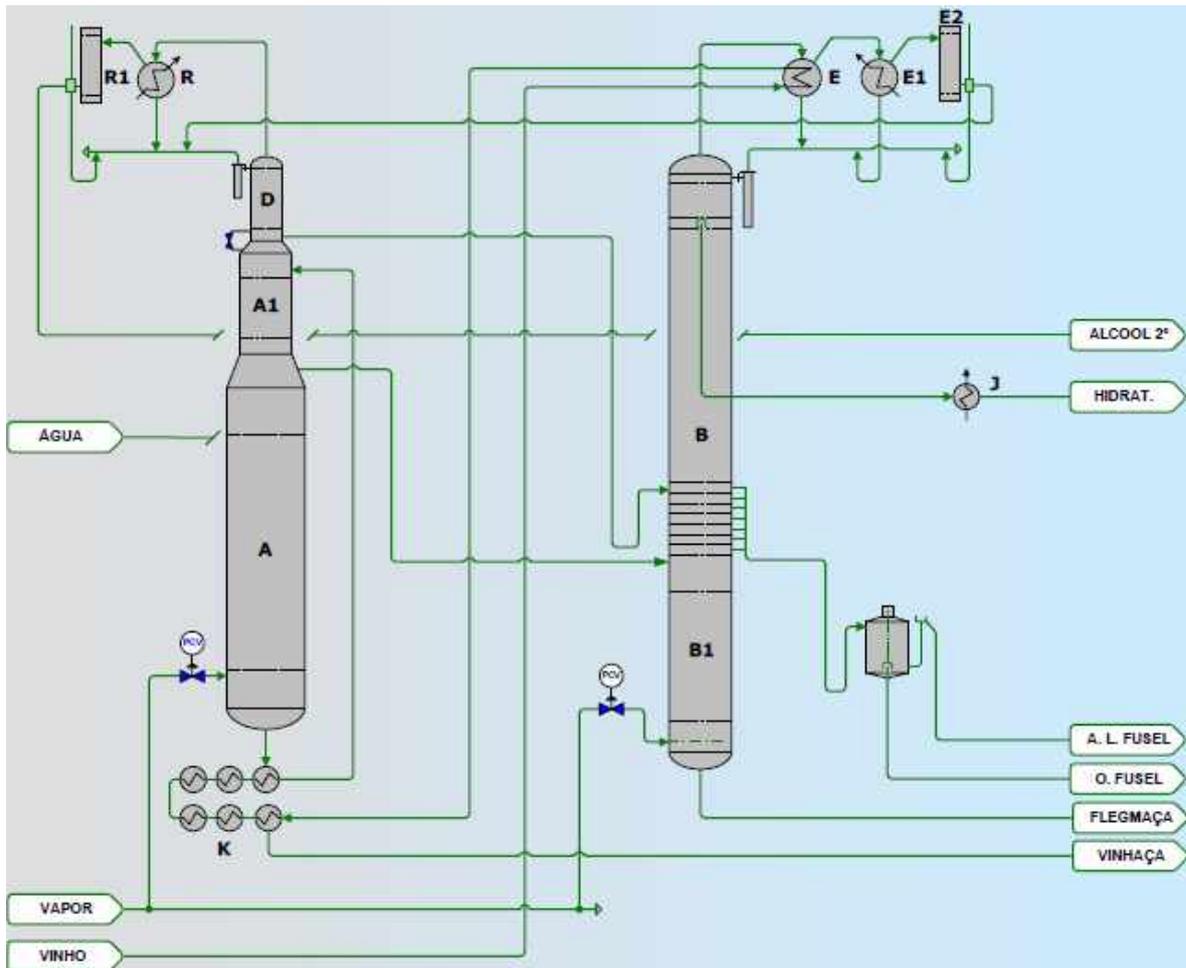


Fonte: BARRETO; COELHO, 2012

À instalação normalmente contém duas colunas separadas, porém nesse caso as colunas A e B atuam como uma única coluna de destilação, a coluna A opera como seção de esgotamento do vinho e a B como seção de enriquecimento e retificação da flegma (fração que contém os componentes voláteis do vinho e da água).

No topo da coluna A, o vinho, na forma líquida, é alimentada à uma temperatura pouco acima de 90°C. Esta coluna costuma ter de 16 a 24 pratos, quantidade que é suficiente para garantir um bom esgotamento do vinho com pouca perda de etanol no produto de fundo. Neste caso, o vinho centrifugado, com teor em etanol na faixa de 6,0 – 10% em volume, passa no pré-aquecedor de vinho (E) no qual é aquecido até 70°C, em contracorrente com os vapores no topo da coluna de retificação (B) e, em seguida vai para os trocadores K, para complementar o aquecimento até 92-93°C, com o calor parcial da vinhaça. Após o aquecimento, o vinho alimenta o prato 4 da coluna A<sub>1</sub>, para que os produtos voláteis, principalmente aldeídos e ésteres, passem à coluna D, para concentração, Figura 16.

**Figura 16:** Fluxograma sistema completo ABB<sub>1</sub> + A<sub>1</sub>D



**Fonte:** ADAPTADO FINGUERUT, 2014

Os vapores concentrados saem pelo topo da coluna para condensar nos trocadores de calor R e R1; parte desses vapores retorna para o prato superior (refluxo) e parte é retirada como álcool de segunda. O produto de fundo da coluna D segue para o conjunto de retificação (BARRETO; COELHO,2012).

O vinho desce os pratos através dos vertedores até a caldeira (base da coluna), saindo como vinhaça, produto de fundo quase isento de etanol, com menos de 0,03% em volume, é usado na fertirrigação dos canaviais. O vapor de escape; vapor de descarga das turbinas de contrapressão, com pressão de 1,0 – 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>, ou vegetal; vapor gerado na concentração do caldo no primeiro estágio dos evaporadores de múltiplo efeito, com pressão de 0,7 kgf/cm<sup>2</sup>, alimenta a caldeira da coluna de destilação (A) através de borbotagem direta ou refervedor (indireta) e sobre os pratos através dos borbulhadores, empobrecendo em etanol o vinho que desce e enriquecendo os vapores que sobem.

No fundo da coluna A, é retirada a vinhaça, efluente da destilaria com baixo teor de etanol, menos de 0,03%, alto poder poluente e alto valor fertilizante, utilizado principalmente na fertirrigação dos canaviais. Para cada litro de etanol, 12 litros de vinhaça são produzidos (PARAIZO, 2013).

O produto retirado do topo da coluna A alimenta o conjunto de retificação na parte de cima da alimentação da coluna B, que possui em torno de 40 pratos ou mais e é alimentada diretamente com flegma na fase vapor e alcança concentrações próximas de 93% em massa (94,4°GL ou 0,839 em fração molar) no álcool hidratado.

Os vapores enriquecidos com etanol são retirados no topo da coluna B, condensados (condensador E, E1 e E2) e retornam para a coluna. O etanol hidratado, com concentração de 93 ° INPM, é retirado de alguns pratos, abaixo do topo, para diminuir a contaminação por produtos voláteis e, então, é resfriado e armazenado e a outra parte é usada como reciclo e a onde é empregado uma seção adicional de esgotamento, coluna B<sub>1</sub>. Neste caso a corrente líquida é esgotada na coluna B<sub>1</sub> que é aquecida por borbotagem de vapor de baixa pressão. O produto de fundo dessa coluna é conhecido como flegmaça, contém 0,02% em massa de etanol.

Apesar de contém um teor alcoólico próximo do da vinhaça, o flegmaça é uma corrente mais pura, que contém componentes voláteis mais pesados, produtos do flegma vaporizado na primeira coluna. Por ser uma corrente composta basicamente por água e com alto grau de pureza, o flegmaça é usado na limpeza dos equipamentos e adicionado à vinhaça que é usada na fertirrigação.

Durante a destilação, óleo fúsel (mistura de álcoois superiores) se acumula nos pratos, se esse óleo não for retirado, o mesmo pode provocar perdas no processo. Dessa forma, ele é retirado, resfriado e estocado para posterior venda para a indústria química.

O controle da operação é feito por meio de acompanhamento das temperaturas de determinados pratos e da pressão de operação das colunas (pressão manométrica). O consumo de vapor é função do teor alcoólico do vinho e da tecnologia de destilação empregada. Nas plantas que têm como objetivos principais a produção de etanol e geração de energia elétrica para venda, a tendência é a implantação da destilação a vácuo, que permite consumos de vapor até 50% menores do que na destilação à pressão atmosférica.

O consumo da água de refrigeração depende da eficiência dos condensadores e da qualidade da água. Na Tabela 8, são mostrados alguns valores de referência.

**Tabela 8:** Dados operacionais da produção de álcool carburante

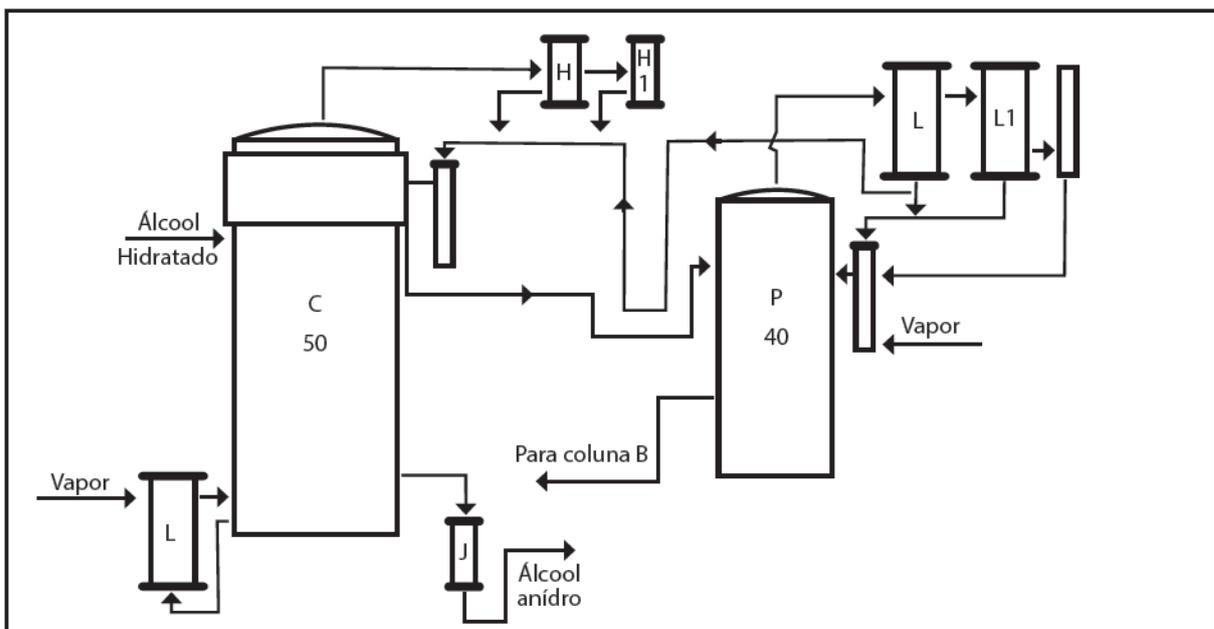
Parâmetro	Valor
Temperatura - prato A <sub>1</sub>	106 - 110°C
Temperatura - prato A <sub>20</sub>	98 - 102°C
Temperatura - prato B <sub>1-1</sub>	104 - 108°C
Temperatura - prato B <sub>4</sub>	88 - 92°C
Pressão - coluna A	4,5 - 5,5 mca
Pressão - coluna B <sub>1</sub>	3,5 - 4,5 mca
Consumo de água	45 - 60 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> de álcool
Consumo de vapor	2,0 - 3,2 kg/l de álcool

Fonte: ANP, 2002

#### 4.5 Produção de Álcool Anidro

Não é possível obter o álcool anidro somente pelo processo de destilação, pois, em alta concentração, a mistura etanol e água é azeotrópica (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001). Existem alguns métodos químicos e físicos utilizados na desidratação do etanol, sendo que a desidratação azeotrópica por ciclohexano é o mais tradicional método em uso no Brasil (NASCIMENTO *et al.*, 2013).

**Figura 17:** Esquema da destilação para a obtenção do etanol anidro



Fonte: BARRETO; COELHO, 2012

Na desidratação azeotrópica, o etanol hidratado é alimentado na desidratadora (coluna C), conforme já ilustrado na Figura 17, e ocorre a mistura com o cicloexano. Esses componentes formam uma mistura azeotrópica, com ponto de ebulição inferior ao de qualquer um dos componentes isolados. Na coluna, acontecerá a seguinte distribuição: na região superior: o ternário, água, etanol e desidratante; na zona intermediária: a mistura etanol e desidratante, e, na zona inferior, o produto final, etanol anidro. (BARRETO; COELHO, 2012).

O vapor ternário é condensado nos tocadores de calor (H e H<sub>1</sub>) e segue para o decantador, onde ocorre a separação de duas camadas. A camada superior é rica em desidratante e retorna para a coluna C, e a parte inferior, rica em água, segue para a coluna P, onde mais desidratante é recuperado (BARRETO; COELHO, 2012). Após esse processo, o etanol anidro está pronto para a comercialização.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os avanços nas pesquisas na área de biocombustíveis são de grande importância na atual conjuntura, em virtude de uma preocupação maior com o desenvolvimento de fontes energéticas renováveis e mais limpas, que permitiram avançar na superação da necessidade de combustíveis fósseis. Neste contexto, o etanol ganha espaço por ser um combustível renovável e, também, sustentável.

O processo de produção do etanol pode ser dividido em etapas, inicia-se com a recepção e preparação da matéria-prima, seguido da extração do caldo em conjunto de moendas. Este caldo é tratado e segue para as dornas de fermentação, cujo o processo pode ser conduzido de quatro formas diferentes: descontínuo (batelada), descontínuo alimentado, semicontínuo ou contínuo. Sendo o processo *Melle-Boinot* o mais utilizado nas destilarias no Brasil.

O vinho que vem da fermentação tem seu álcool recuperado por destilação, processo que ocorre em colunas de estágios que se utiliza dos diferentes pontos de ebulição das diversas substâncias voláteis presentes, separando-as. A instalação é normalmente organizada com duas colunas separadas, onde a coluna denominada A opera como seção de esgotamento do vinho e a coluna nomeada B opera como seção de enriquecimento e retificação da flegma. Outro esquema de destilação alcoólica consiste no emprego de uma seção adicional de esgotamento, denominado coluna B<sub>1</sub>. Neste caso a corrente líquida que deixa a coluna B não retorna a coluna A, mas é esgotado na coluna B<sub>1</sub>.

O presente trabalho fez uma análise detalha do sistema completo  $ABB_1 + A_1D$  para produção do etanol hidratado, aonde no topo da coluna A, que costuma ter de 16 a 24 pratos, o vinho, na forma líquida, é alimentada após passar no pré-aquecedor de vinho (E), em contracorrente com os vapores no topo da coluna de retificação (B) e, em seguida nos trocadores K. Após o aquecimento, o vinho alimenta o prato 4 da coluna  $A_1$ , para que os produtos voláteis, principalmente aldeídos e ésteres, passem à coluna D, para concentração.

O produto de fundo da coluna D segue para o conjunto de retificação. O vinho desce pela coluna através dos vertedores até a caldeira (base da coluna), saindo como vinhaça, produto de fundo quase isento de etanol é usado na fertirrigação dos canaviais.

O vapor gerado na concentração do caldo alimenta a caldeira da coluna de destilação (A) através de borbotagem direta ou refervedor (indireta) e sobre os pratos através dos borbulhadores, empobrecendo em etanol o vinho que desce e enriquecendo os vapores que sobem. No fundo da coluna A, é retirada a vinhaça, efluente da destilaria com baixo teor de etanol.

O produto retirado do topo da coluna A alimenta o conjunto de retificação na parte de cima da alimentação da coluna B, que possui em torno de 40 pratos ou mais e é alimentada diretamente com flegma na fase vapor e alcança concentrações próximas de 93% em massa no álcool hidratado.

Os vapores enriquecidos com etanol são retirados no topo da coluna B, condensados e retornam para a coluna. O etanol hidratado é retirado de alguns pratos, abaixo do topo, para diminuir a contaminação por produtos voláteis e, então, é resfriado e armazenado e a outra parte é usada como reciclo e aonde é empregado uma seção adicional de esgotamento, coluna  $B_1$ .

O controle da operação é feito por meio de acompanhamento das temperaturas de determinados pratos e da pressão de operação das colunas (pressão manométrica). O consumo de vapor é função do teor alcoólico do vinho e da tecnologia de destilação empregada. O consumo da água de refrigeração depende da eficiência dos condensadores e da qualidade da água.

## REFERÊNCIAS

- AÇÚCAR E ETANOL. Disponível em:  
[https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset\\_acucar\\_etanol.pdf](https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_acucar_etanol.pdf) Acesso em: 10 de abril de 2017
- AMABIS, J. M.; MARTHO, G. R. *Biologia*. Vol. 1. 2ª ed. Editora Moderna. São Paulo, 2004.
- Anuário Estatístico 2002 – ANP. Disponível em:  
<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico/2426-anuario-estatistico-2002> Acesso em: 18 de maio de 2017
- ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE GOIÁS (Org.). *A importância do etanol*
- BARRETO, T. V.; COELHO, A. C. *Destilação*. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.). *Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol*. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012. p. 489-513.
- BARRETO, T.V; DUARTE-COELHO, A.C.2008. Otimização do dimensionamento de aparelhos para produção de álcool hidratado. Anais do 9º Congresso Nacional de STAB. Maceió. STAB
- Biotecnologia industrial: engenharia bioquímica*. São Paulo: Edgard Blücher, 2001a. v. 2. p.
- BNDES E CGEE. (Org.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento*
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Anuário estatístico de agroenergia* 2013. 2014b. Disponível em:  
<http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimentosustentavel/agroenergia/estatistica> Acesso em 7 de junho de 2017.
- C. (Ed.). *Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol*. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012. v. 1. p. 451-487.
- C. (Ed.). *Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol*. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012. v. 1. p. 451-487.
- CARVALHO, J. C.; SATO S. *Fermentação descontínua*. In: SCHIMIDEL, W. *et al* (Coord.).
- CAVALHEIRO, A.; MONTEIRO, G. *Solving ethanol production problems with genetically*
- CRAGO, C. L. *et al*. *Competitiveness of Brazilian sugarcane ethanol compared to US corn ethanol*. *Energy Policy*, v. 38, n. 12, p. 7404-7415, nov. 2010.33
- Edgard Blücher, 2001. v. 2. p. 179-192.
- FREITAS, T. *Subsídio a gasolina prejudica etanol*. *Folha de São Paulo*, São Paulo, n. 31.028, 16 mar. 2014. *Folha Mercado*.

- GOLDEMBERG, J. Os limites do etanol de primeira geração. In: Ethanol Summit 2007 São  
iea-energy-technology-essentials-biofuel-production.html Acesso em 19 de agosto de 2017.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Energy technology essentials: biofuel production.
- J. FINGUERUT, Tecnologias de Conversão da Biomassa. Florianópolis, 2014
- Jaeger Trays and Hardware. Disponível em [http://www.jaeger.com/trays\\_hdwr.htm](http://www.jaeger.com/trays_hdwr.htm). Acesso em: 20 de setembro de 2017
- LIMA, U. D.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. Produção de etanol. In: LIMA, U. D. *et al* (Coord.). Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos. São Paulo: Edgard Blucher, 2001. v. 3. p. 1-43.
- modified yeast strains. Brazilian Journal of Microbiology, v. 44, p. 665-671, set. 2013.
- NASCIMENTO, F. S. *et al*. Processos de produção de etanol anidro no Brasil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 8., São Paulo. Anais... São Paulo, 2013.
- para a economia brasileira. 2009. Disponível em: <http://algo.jusbrasil.com.br/noticias/1159554/a-importancia-do-etanol-para-a-economia-brasileira> Acesso em 01 de março de 2017.
- PARAIZO, D. Uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar. 2013. Disponível em: Paulo. Anais... São Paulo: União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2007. v. 1. p. 33-42.
- PAYNE, J. H. Operações unitárias na produção de açúcar de cana. São Paulo: Nobel S.A.,
- SCHMIDELL, W.; FACCIOTTI, M. C. Biorreatores e processos fermentativos. In: SCHMIDEL, W. *et al* (Coord.). Biotecnologia industrial: engenharia bioquímica. São Paulo: SOUZA, E. L. L. de *et al*. Etanol e Bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. 1. ed. 2006.
- sustentável. Rio de Janeiro: Bndes, 2008. 316 p.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Açúcar e Álcool – A produção do Álcool. Disponível em: <http://www.unica.com.br/multimedia/videocast/default.asp?mmdCode=9A64FC42-5CA7-4D66-95D3-AB2540184A38> Acesso em: 21 de junho de 2017.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Disponível em: <http://www.unica.com.br/FAQ/> Acesso em: 18 de maio de 2017.
- VASCONCELOS, J. N. Fermentação etanólica. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, VASCONCELOS, J. N. Fermentação etanólica. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, [www.novacana.com/cana/uso-vinhacacultura](http://www.novacana.com/cana/uso-vinhacacultura) Acesso em: 07 de setembro de 2017.

ZANARDI, M. S.; JUNIOR, E. F. C. Tecnologia e perspectiva da produção de etanol no Brasil. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 17, n. 27, p. 01-118, jan./jun. 2015.