



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# **Análise de Pesquisas sobre a Desalcoolização de cervejas através de processos de separação por membranas**

*Autor: Nicholas Stefanello Luz*

*Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Isabel Cristina Tessaro*

Porto Alegre, maio de 2021

Autor: Nicholas Stefanello Luz

# Análise de pesquisas sobre a Análise de Pesquisas sobre a Desalcoolização de cervejas através de processos de separação por membranas

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química*

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Isabel Cristina Tessaro

Banca Examinadora:

Professor Doutor Nilson Romeu Marcilio, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Professor Doutor Alan Ambrosi, Universidade Federal de Santa Catarina

Porto Alegre

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, aos meus pais, Edimar e Martha, e ao meu irmão, Matheus, por terem me dado todo o apoio, suporte e confiança necessários para a conclusão desse curso.

À minha namorada, Andressa, quem eu tive a sorte de conhecer nesse curso. Por todo amor, carinho, companheirismo, motivação e por estar sempre ao meu lado.

À minha professora orientadora Isabel Cristina Tessaro pela oportunidade de desenvolver este trabalho ao seu lado, pela ajuda, paciência e dedicação durante esse processo.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, à Escola de Engenharia e ao Departamento de Engenharia Química por me proporcionarem uma formação de excelência.

A todos professores da UFRGS, por todo incentivo e apoio ao longo do curso. Por todos os ensinamentos e lições aprendidas.

Aos meus amigos e colegas de turma por todo companheirismo, parceria e risadas ao longo desses anos. Em especial Angelo, Eduardo, Daniel, Heloísa, Luis e Matheus.

Por tudo isso, muito obrigado!

## RESUMO

A busca por métodos eficazes de desalcoholização de bebidas tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores devido ao crescente consumo de bebidas não alcoólicas. Esse aumento se deve, principalmente, a preocupações com a saúde e leis de trânsito mais rigorosas. Nesse contexto, a cerveja não alcoólica se torna uma opção interessante frente a outras bebidas por trazer os componentes bioativos da cerveja tradicional sem os efeitos prejudiciais do álcool. Com isso, os processos de separação por membranas (PSM) surgem como uma excelente alternativa para remoção de álcool da cerveja, visto que podem operar a baixas temperaturas e apresentam baixo consumo energético. Este trabalho tem como objetivo avaliar estudos que utilizam processos de separação com membranas para desalcoholização de cervejas. Para apontar os estudos com os melhores resultados, foi realizada uma revisão bibliográfica, com busca em bases de dados, visando comparar os sistemas aplicados em cada processo quanto aos materiais das membranas, condições de operação, remoção de etanol, fluxos e características do produto obtido. Os resultados mostram que dentre os processos analisados neste estudo, a maioria apresentou competitividade para obtenção de um produto final desalcoholizado. A pervaporação, no entanto, mostrou-se mais adequada para remoção e concentração de aromas, podendo ser combinada com outros PSM, visto que nesses processos é observada uma perda de compostos de aroma, devido às membranas não conseguirem reter totalmente esses compostos. Para uma possível réplica em larga escala, apenas a diálise não apresenta grande potencial, devido aos baixos fluxos, tornando o processo menos competitivo que os outros. Finalmente, para cada processo foram apresentados os materiais e as condições utilizados nos estudos que obtiveram melhor remoção de etanol, com menor perda de características organolépticas, assim como as vantagens, limitações e possíveis melhorias.

**Palavras-chave:** *desalcoholização de cervejas, remoção de etanol, diálise, pervaporação, destilação osmótica, osmose inversa, osmose direta.*

## ABSTRACT

*The search for effective methods of dealcoholization of beverages has been the object of study of several researchers due to the growing consumption of non-alcoholic beverages. This increase is mainly due to health concerns and stricter traffic laws. In this context, non-alcoholic beer becomes an interesting option compared to other drinks because it brings the bioactive components of traditional beer without the harmful effects of the alcohol. Thus, the membrane separation processes (MSP) emerge as an excellent alternative for removing alcohol from beer, since they can operate at low temperatures and have low energy consumption. This work aims to evaluate studies that use membrane separation for beer dealcoholization. In order to point out the studies with the best results, a bibliographic review was carried out, searching databases, aiming to compare the systems employed in each process regarding the membrane materials, operating conditions, ethanol removal, flows and product characteristics. The results show that among the processes analyzed in this study, the majority of them present competitiveness to obtain a dealcoholized final product. Pervaporation, however, proved to be more suitable for removing and concentrating aromas, and it could be combined with other MSP, since it is shown loss of aroma compounds in these processes, due to the membranes not being able to fully retain these compounds. For a possible scale-up, dialysis shows no great potential, due to the low fluxes, which makes the process less competitive than the others. Finally, for each process, the materials and conditions used in the studies that provided higher ethanol removal, with less loss of organoleptic characteristics, as well as the advantages, limitations and possible improvements were presented.*

**Keywords:** *beer dealcoholization, ethanol removal, dialysis, pervaporation, osmotic distillation, reverse osmosis, forward osmosis.*

---

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1:</b> Processo de Separação por Membrana utilizando filtração do tipo cross-flow. ....	7
<b>Figura 2.2:</b> Diagrama de fluxo da desalcoolização da cerveja por diálise. ....	9
<b>Figura 2.3:</b> Diagrama esquemático do funcionamento do processo de pervaporação integrado a um reator. ....	10
<b>Figura 2.4:</b> Diagrama esquemático do processo de desalcoolização do vinho utilizando destilação osmótica. ....	12
<b>Figura 2.5:</b> Diagrama esquemático do processo de desalcoolização da cerveja utilizando osmose inversa. ....	14
<b>Figura 2.6:</b> Desenho esquemático de um processo de osmose direta em modo co-corrente. ....	15

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1:</b> Síntese da busca inicial nas bases de dados e bibliotecas eletrônicas. ....	18
<b>Tabela 2:</b> Estudos que utilizaram processo de separação por membranas para desalcoolização de cerveja. ....	20
<b>Tabela 3:</b> Estudos que utilizaram diálise como processo para desalcoolização de cerveja. ...	22
<b>Tabela 4:</b> Estudos que utilizaram pervaporação como processo para desalcoolização de cerveja. ....	23
<b>Tabela 5:</b> Estudos que utilizaram destilação osmótica como processo para desalcoolização de cerveja. ....	23
<b>Tabela 6:</b> Estudos que utilizaram osmose inversa como processo para desalcoolização de cerveja. ....	24
<b>Tabela 7:</b> Estudos que utilizaram osmose direta como processo para desalcoolização de cerveja. ....	25
<b>Tabela 8:</b> Comparação qualitativa dos processos de separação de membranas para desalcoolização de cervejas. ....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>DI</i>	Diálise
<i>DO</i>	Destilação Osmótica
<i>OD</i>	Osmose Direta
<i>OI</i>	Osmose Inversa
<i>PSM</i>	Processos de Separação por Membranas
<i>PV</i>	Pervaporação

## SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica	3
2.1	Cerveja	3
2.1.1	Mercado econômico da cerveja	3
2.2	A cerveja não alcoólica	4
2.3	Processos para desalcoolização de cervejas	4
2.4	Métodos Biológicos	5
2.5	Métodos Físicos	5
2.5.1	Tratamentos Térmicos	5
2.5.2	Extração	6
2.5.3	Processos de Separação por Membranas	6
2.5.3.1	Diálise	8
2.5.3.2	Pervaporação	10
2.5.3.3	Destilação Osmótica	11
2.5.3.4	Osmose Inversa	12
2.5.3.5	Osmose Direta	14
3	Metodologia	17
4	Resultados e Discussão	18
4.1	Artigos selecionados	18
4.2	Discussão	26
4.2.1	Diálise	26
4.2.2	Pervaporação	26
4.2.3	Destilação Osmótica	27
4.2.4	Osmose Inversa	28
4.2.5	Osmose Direta	28
5	Considerações Finais	32
	REFERÊNCIAS	34



## 1 Introdução

O setor de alimentos no Brasil é um dos segmentos que mais cresce, o que acarreta uma necessidade de aumento de produção de produtos e serviços, assim como uma diversificação destes para atender as exigências dos consumidores. Bebidas alcoólicas, em especial a cerveja, são produtos alimentícios com maior consumo entre os alimentos líquidos da população brasileira. A produção de cerveja no Brasil apresenta uma tendência crescente nos últimos 30 anos, e recentemente alcançou o patamar de 14,1 bilhões de litros de cerveja produzidas em um ano, colocando o Brasil em terceiro lugar no ranking mundial atrás da líder China e dos EUA (KIRIN BEER UNIVERSITY, 2019; MARCUSSO; MULLER, 2017).

Semelhantemente, o consumo e produção de bebidas não alcoólicas também aumentou consideravelmente nas últimas décadas, principalmente devido às novas leis de trânsito, que proíbem a direção sob influência alcoólica, e também às preocupações com a saúde, pois álcool em excesso prejudica o organismo humano. Com isso, cervejas não alcoólicas se tornam alternativas interessantes a outras bebidas não alcoólicas por trazerem os componentes bioativos da cerveja tradicional sem os efeitos prejudiciais do álcool (DE GAETANO *et al.*, 2016).

Os métodos de obtenção de cerveja não alcoólica podem ser divididos em dois grandes grupos – rotas biológicas, onde há a restrição da geração de etanol e rotas físicas, onde há a remoção do etanol da cerveja tradicional utilizando métodos de separação. Estes métodos são ainda divididos em três grupos, tratamentos térmicos, extração e processos de separação por membranas (PSM).

Dentre os métodos de separação, os mais utilizados são os tratamentos térmicos, como a evaporação e destilação, no entanto, o uso desses processos acarreta um impacto térmico na cerveja, afetando suas características organolépticas. Desta forma, os PSM ganharam espaço nessa indústria, pois além de oferecerem um produto com pouco teor alcoólico, operam em condições de temperaturas baixas, possuem baixo consumo energético, e necessitam pouco ou nenhum aditivo químico.

Considerando a diversidade de materiais de membranas disponíveis no mercado, os diferentes processos existentes e condições de operações, neste estudo pretende-se realizar uma revisão de literatura sobre a desalcoolização de cerveja utilizando membranas,

comparando as publicações quanto aos resultados e aos parâmetros encontrados, a remoção de etanol, fluxos de permeado e características do produto final.

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise dos resultados encontrados na literatura para remoção do etanol de cervejas utilizando processos de separação por membranas. Com base nos trabalhos encontrados foi realizada uma comparação dos dados obtidos de remoção de etanol, membranas utilizadas, condições de operação, fluxos e características do produto desalcoolizado. Além disso, foram feitas sugestões para trabalhos futuros e, com base nos dados obtidos, apontados os sistemas com maior potencial para a desalcoolização da cerveja.

## 2 Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão apresentados métodos de desalcoolização de cervejas, conceitos importantes para a compreensão dos processos de separação por membranas, bem como suas vantagens e limitações, a fim de realizar posterior comparação de resultados obtidos na literatura.

### 2.1 Cerveja

A cerveja é a bebida alcoólica mais popular no mundo, sendo a terceira bebida mais popular, atrás apenas de água e chá. A fabricação de cerveja geralmente é considerada como sendo originada de um subproduto do desenvolvimento da agricultura, embora uma minoria considere ter sido originada como consequência do desejo do homem por álcool. Qualquer que seja a origem exata, artefatos históricos permitem rastrear a fabricação de cerveja até os Mesopotâmios, por volta de 6000 a 7000 anos atrás (STEWART, G.G., & PRIEST, 2006). No Brasil, a cerveja foi trazida pela Família Real Portuguesa para consumo próprio, e em 1834, deu-se início à produção da primeira cerveja nacional, no Rio de Janeiro (SANTOS, 2003).

As principais matérias-primas utilizadas para o processo de produção da cerveja são água, malte, extrato de lúpulo e leveduras. O processo consiste em uma série de etapas para converter a fonte de amido em um líquido açucarado chamado mosto, e converter seus açúcares em álcool pela fermentação com leveduras. Estas etapas ocorrem durante a mosturação, fermentação e maturação, intercaladas com operações de separação como filtragens e clarificações.

#### 2.1.1 Mercado econômico da cerveja

O mercado de cerveja é muito importante na indústria alimentícia mundial. Em 2018, 191 bilhões de litros de cerveja foram produzidos, um aumento de 5,5 % comparado ao ano de 2009. Liderando a produção global, a região asiática representa 32 % do mercado global, enquanto a Europa representa 27,3 % e a América Central e América Latina juntas somam 19,3 %, formando as três primeiras posições de maiores produtores de cerveja. O Brasil lidera a produção na América Latina, tendo se tornado, recentemente, o terceiro maior produtor do

mundo, com a produção de 14,1 bilhões de litros anuais, atrás apenas da China e dos Estados Unidos (KIRIN BEER UNIVERSITY, 2019).

## 2.2 A cerveja não alcoólica

O mercado global de bebidas sem álcool apresentou um aumento significativo durante os últimos anos. Este crescimento é resultado de novos hábitos de consumo, visando a redução da ingestão de álcool, devido a alguns motivos, como leis de trânsito mais restritivas, preocupações com a saúde, razões religiosas ou gravidez (CATARINO, 2010). Em alguns países, como a Alemanha, o mercado de cervejas sem álcool representa mais de 5 %, enquanto em outros países como Estados Unidos e Brasil, ainda representa menos de 2 %, indicando que há muito espaço para crescimento. A *International Wine & Spirit Research* (IWSR), provedor global de dados e inteligência de mercado de bebidas alcoólicas, prevê um crescimento no volume de consumo global de cervejas sem álcool de 47 % entre 2019 e 2024 (IWSR, 2019).

A diferença entre uma cerveja tradicional alcoólica e uma cerveja sem álcool é regulada pela legislação vigente de cada país de acordo com a classificação feita quanto à concentração de etanol presente na bebida (AMBROSI, 2016). O conteúdo de etanol que define uma cerveja sem álcool varia entre os países, sendo na maioria dos casos 0,5 vol.% de etanol o máximo valor aceito (BRIGGS *et al.*, 2004). Na legislação brasileira, a cerveja é considerada não alcoólica quando possui teor alcoólico inferior a 0,5 %, além disso, desde 2019, passou a existir também a cerveja de baixo teor alcoólico, com conteúdos de etanol entre 0,5 e 2 %.

## 2.3 Processos para desalcoholização de cervejas

Os processos conhecidos de obtenção de cervejas sem álcool podem ser divididos em 2 grandes grupos – restrição da formação de etanol e remoção de etanol. Os métodos de restrição da formação do etanol são chamados de métodos biológicos, pois atuam durante a fermentação a fim de controlar a formação do etanol. Enquanto os métodos de remoção de etanol são chamados de métodos físicos, ou métodos de desalcoholização, pois atuam no produto final, visando remover o etanol da cerveja. O foco do presente trabalho é a remoção do etanol utilizando processos de separação por membranas, desta forma os demais métodos de remoção serão abordados brevemente.

## 2.4 Métodos Biológicos

Os métodos biológicos consistem na restrição da formação do etanol durante a fermentação. As técnicas mais utilizadas consistem no uso de leveduras especiais, na alteração do mosto, ou em limitar a capacidade de fermentação da levedura. A maior vantagem destes métodos é que podem ocorrer em cervejarias tradicionais sem equipamento especial, ou seja, não é necessário um investimento extra (GÜZEL; GÜZEL; SAVAŞ BAHÇECI, 2019). Algumas desvantagens são a perda de sabores e aromas, e um gosto mais doce do que aquele da cerveja tradicional (BRÁNYIK *et al.*, 2012; CATARINO; MENDES, 2011; MONTANARI, 2009).

## 2.5 Métodos Físicos

Os métodos físicos consistem na remoção do etanol do produto final, e envolvem custos adicionais para a produção com a instalação de equipamentos específicos. Esses métodos podem ser divididos em três grupos: tratamentos térmicos, extração e processos de separação por membranas.

### 2.5.1 Tratamentos Térmicos

Nos métodos térmicos, o etanol é removido da cerveja utilizando aquecimento. A separação do etanol da água ocorre devido às diferenças nas temperaturas necessárias para evaporação dos componentes, pois o ponto de ebulição do etanol é de 78 °C, enquanto o da água é de 100 °C. Ao aplicar uma temperatura inferior a 100 °C, o álcool evapora e sua separação da cerveja é possível (CATARINO, 2010). Porém, a utilização de temperaturas elevadas é prejudicial a compostos sensíveis ao calor, que podem sofrer mudanças químicas ou físicas (KARLSSON; TRÄGÅRDH, 1997), reduzindo a qualidade da cerveja.

O que pode ser feito para contornar esse problema é a aplicação de pressões baixas ou vácuo, podendo realizar a separação com temperaturas inferiores à de ebulição do etanol. Isso é feito em alguns métodos térmicos, como na evaporação a vácuo, na destilação a vácuo e na evaporação centrífuga (*Spinning Cone Column*). A diferença desses processos é apenas no sistema de engenharia, o processo de separação é sempre baseado nas diferenças de volatilidade.

Quanto à evaporação e destilação a vácuo, ambos métodos necessitam adição de equipamento extra, possuem altos custos de energia, impacto térmico nos compostos sensíveis, além disso, alguns compostos de aromas voláteis são removidos juntamente com o etanol (KUNZE, 1999; M.J. LEWIS, 1995).

Na evaporação centrífuga, o impacto térmico é minimizado, o tempo de residência é baixo, há alto fluxo turbulento e grande área de contato entre as fases. Porém necessita equipamento extra, com altos gastos energéticos, além de o meio removedor, o vapor que carrega o álcool para fora da coluna, também remover os compostos de aromas (PICKERING, 2000; WRIGHT; PYLE, 1996).

### 2.5.2 Extração

Os processos de extração ocorrem quando um componente é removido, ou separado, de um sistema utilizando um outro material, ou fase, que possui uma maior afinidade com esse componente. Os métodos existentes são a extração com solvente, neste caso é utilizado dióxido de carbono líquido ou supercrítico, e a adsorção.

A extração com dióxido de carbono produz uma bebida de boa qualidade, uma vez que a água, os sais e outras macromoléculas não são extraídas. Além disso, o processo pode ocorrer à temperatura ambiente, minimizando a degradação dos compostos termolábeis (CATARINO, 2010). No entanto, esse processo envolve alto custo de operação, com a necessidade de acoplar uma unidade de extração à planta industrial (RUIZ-RODRÍGUEZ *et al.*, 2012).

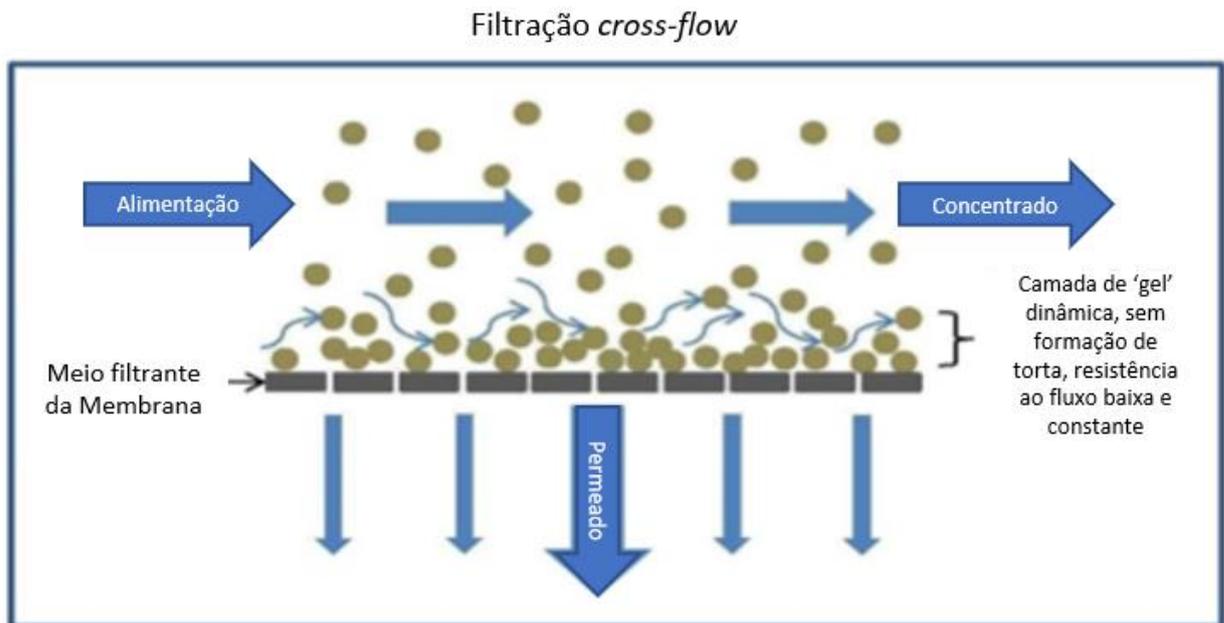
A adsorção consiste na utilização de adsorventes hidrofóbicos, como zeólitas. Nesse processo, as características organolépticas do produto final são bem preservadas quando comparadas ao produto original (MULLER *et al.*, 2020). Porém, esse método é de alto custo e conveniente apenas para aplicações muito específicas, além de alguns compostos de aroma serem adsorvidos juntamente com o etanol (G. BERREBI, Y. GAILLARD, 2002).

### 2.5.3 Processos de Separação por Membranas

As membranas são barreiras permeáveis com capacidade seletiva que controlam a passagem de diferentes substâncias entre duas fases, podendo ser empregadas na purificação de correntes líquidas ou gasosas. Na maioria dos PSM, a solução que se deseja tratar esco

tangencialmente à superfície da membrana e é separada em duas correntes, o permeado que atravessa a membrana e o concentrado que é mantido no lado da alimentação, como mostrado na Figura 2.1. Esse tipo de separação é denominado filtração *cross-flow*, e pode ser aplicado na desalcoolização de cervejas.

**Figura 2.1:** Processo de Separação por Membrana utilizando filtração do tipo *cross-flow*.



Nos processos de separação por membranas, alguns parâmetros se destacam como essenciais para a escolha da membrana e para as análises dos resultados obtidos. Alguns desses parâmetros estão brevemente descritos a seguir.

- Remoção – o quanto de etanol é removido da solução de alimentação ao final do processo.
- Seletividade – capacidade da membrana em transportar ou reter especificamente determinadas substâncias.
- *Fouling* ou Incrustação – acúmulo de substâncias na superfície ou nos poros da membrana, reduzindo sua performance.
- Polarização por concentração - fenômeno de camada limite em que os efeitos de concentração de soluto que ocorrem próximo à superfície da membrana resultam em uma camada extra de resistência, reduzindo a real força motriz do processo.

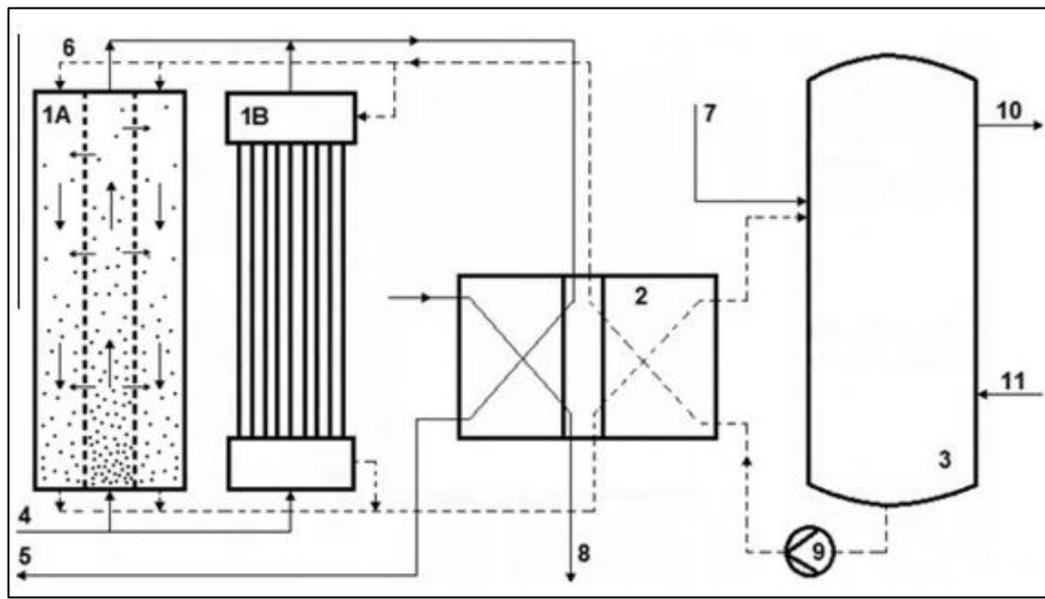
- Fluxo permeado – volume que flui através da membrana por unidade de área e por unidade de tempo.

A desalcoolização utilizando membranas consiste na separação do etanol através de diferenças de temperatura, concentração ou pressão. Esses métodos tornaram-se visados, e são uma alternativa interessante para remoção do etanol, pois podem operar a baixas temperaturas, possuem baixo consumo energético, e necessitam pouco ou nenhum aditivo químico, limitando os danos térmicos aos constituintes da cerveja (AMBROSI; CARDOZO; TESSARO, 2014). Segundo Mangindaan, Khoiruddin e Wenten ( 2018), nos últimos anos, os estudos utilizando processos de separação por membranas se tornaram majoritários no campo de desalcoolização (quase 50 %). Os métodos baseados em membranas mais estudados na desalcoolização de cerveja são diálise (DI), osmose inversa (OI), destilação osmótica (DO), pervaporação (PV) e osmose direta (OD).

#### 2.5.3.1 *Diálise*

O princípio da diálise é baseado na difusão seletiva através de uma membrana semipermeável. A difusão acontece devido ao gradiente de concentração induzir o fluxo seletivo dos componentes entre duas soluções de diferentes composições. O tamanho dos poros da membrana e as propriedades da sua superfície influenciam na seletividade que a membrana apresenta quanto aos solutos. Segundo Ambrosi, Cardozo e Tessaro ( 2014), na produção de cerveja desalcoolizada, o módulo mais comum para separação por diálise é o de fibra oca, porém, módulos de filme plano ou tubulares também podem ser utilizados. Um exemplo do processo de diálise utilizando módulo de fibra oca e um diagrama de desalcoolização da cerveja são mostrados na Figura 2.2.

**Figura 2.2:** Diagrama simplificado do processo de desalcoolização da cerveja por diálise. (1A) princípio da diálise em fibra oca, (1B) representação esquemática do módulo de membrana, (2) trocador de calor, (3) coluna de stripping, (4) cerveja original, (5) cerveja desalcoolizada, (6) dialisado, (7) make-up de água de cerveja, (8) etilenoglicol, (9) bomba de dialisado, (10) condensado alcoólico, (11) vapor de stripping.



Obtido de Brányik *et al.* ( 2012).

No módulo de fibras ocas, a cerveja escoar pelo interior das fibras, enquanto o dialisado sem álcool flui em contracorrente ao longo do lado externo das membranas. O modo em contracorrente é utilizado pois garante um alto gradiente de concentração do álcool entre o dialisado e a cerveja, mantendo uma difusão adequada. A aplicação de pressão em ambos os lados é necessária, para que a difusão não seja perturbada pela liberação de dióxido de carbono. Essa pressão tem de ser pelo menos igual à pressão de saturação do CO<sub>2</sub> na cerveja, na temperatura de operação. Para minimizar perdas de dióxido de carbono, deve-se adicionar uma pequena parte de CO<sub>2</sub> à cerveja (DONHAUSER, S., GLAS, K., MUELLER, 1991; MOONEN; NIEFIND, 1982). As perdas de compostos voláteis de baixa massa molar podem ser prevenidas adicionando esses compostos ao dialisado, reduzindo, desta forma, a sua difusão da cerveja para o dialisado (BRÁNYIK *et al.*, 2012).

Algumas vantagens da diálise são a operação em baixa temperatura e a possibilidade de remover álcool até o limite superior aceito de 0,5 vol.%. Porém também ocorre a perda de

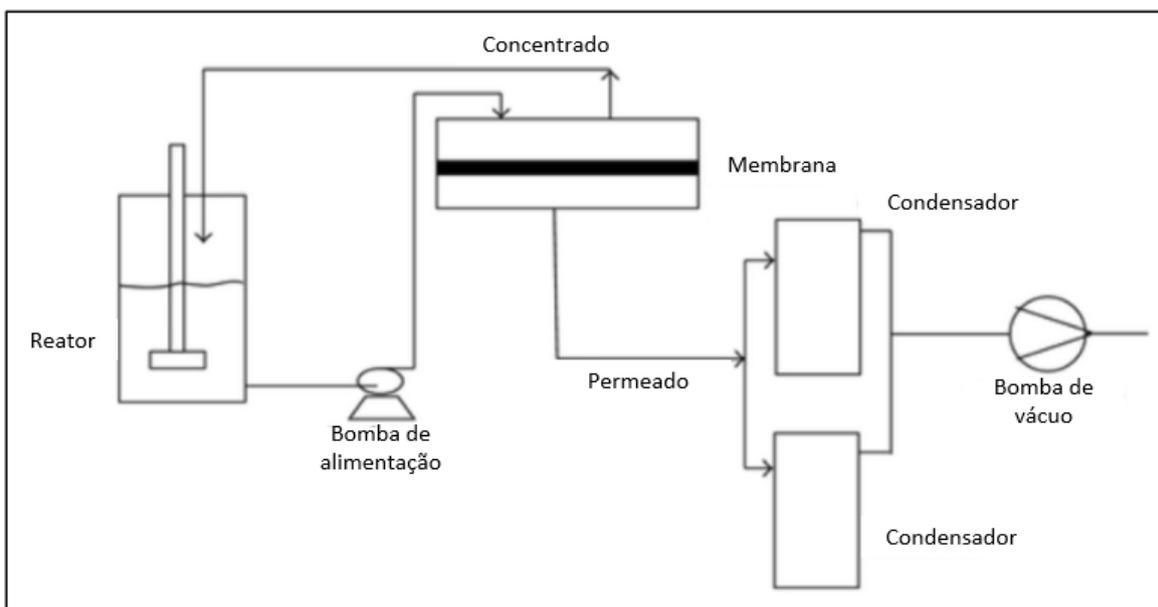
compostos organolépticos, além da geração de uma grande quantidade de álcool muito diluído na solução receptora (LESKOSEK; MITROVIC, 1994; MOONEN; NIEFIND, 1982).

### 2.5.3.2 Pervaporação

No processo de pervaporação, uma alimentação líquida entra em contato com uma membrana polimérica densa, então compostos voláteis permeiam essa membrana, sofrendo evaporação no lado a jusante da membrana (permeado), que é mantido sob vácuo. A força motriz da pervaporação é o gradiente de potencial químico expresso em termos da diferença de pressão parcial através da membrana (CATARINO, 2010). A resistência ou facilidade do processo depende do tamanho, formato e morfologia da membrana (HUANG, 1991).

Diferentemente de outros processos de separação por membrana, o permeado obtido na pervaporação se encontra na fase vapor e é posteriormente recuperado por condensação. Um esquema do processo de pervaporação é mostrado na Figura 2.3. Este método não utiliza solventes tóxicos e sua operação ocorre em condições amenas de temperatura e pressão, evitando a degradação de compostos organolépticos sensíveis à temperatura. Essa alternativa possui duas aplicações interessantes no campo de desalcoolização, uma delas é operando como mecanismo de desalcoolização, e a outra é como mecanismo de recuperação de aromas.

**Figura 2.3:** Diagrama esquemático do processo de pervaporação integrado a um reator.



Para a desalcoolização, são utilizadas membranas hidrofílicas, que são altamente permeáveis para água, permeáveis para compostos pouco hidrofóbicos, como etanol, e pouco permeáveis para compostos hidrofóbicos, que é o caso dos aromas (CATARINO, 2010). Devido ao fato de a água ser mais permeável que o etanol, é utilizado vapor de água do lado permeado para manter as pressões parciais dos outros compostos da cerveja baixas, diminuindo a força motriz da água e apenas etanol e alguns poucos aromas são permeados (E.K. LEE, V.J. KALYANI, 1991). Esse processo, porém, é de alto custo agregado, devido ao vácuo e ao sistema de condensação, além de possuir baixos fluxos, necessitando grandes áreas de membrana (L. TAKÁCS, G. VATAI, 2007).

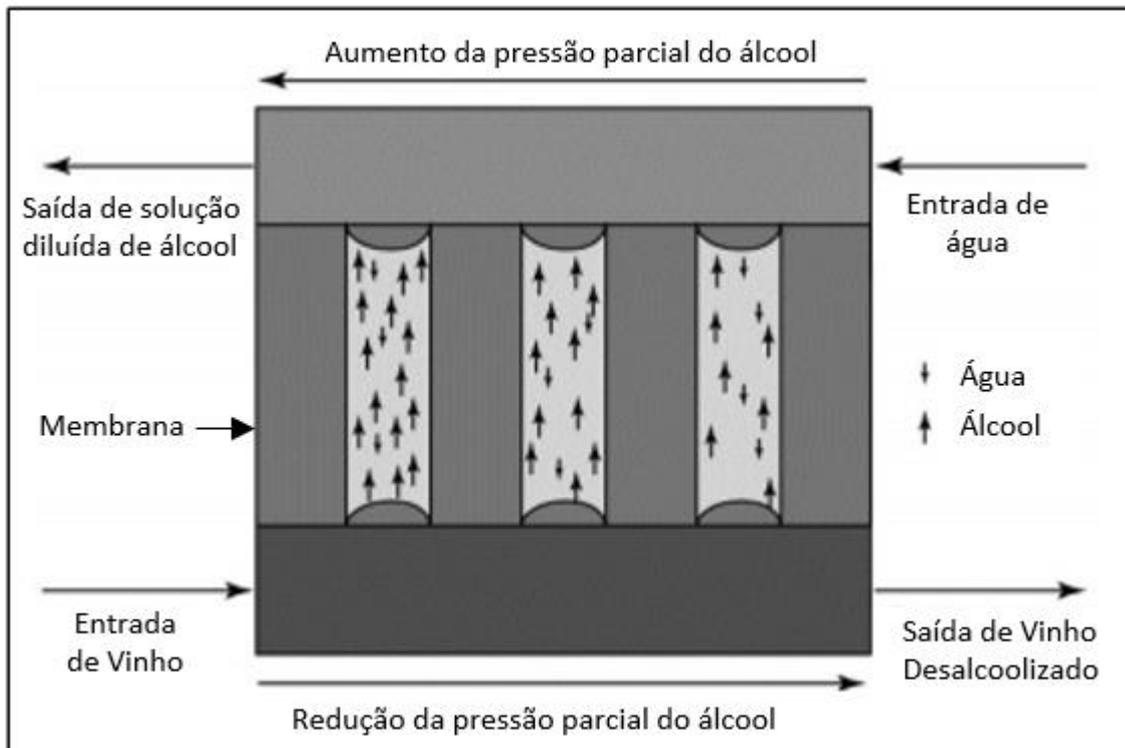
Outra estratégia em que é utilizada a pervaporação é para a recuperação de aromas naturais da cerveja, onde pervaporação é utilizada numa primeira etapa para reter os aromas, e, posteriormente ao processo de desalcoolização, esses aromas são injetados na cerveja final já desalcoolizada. Essa estratégia foi provada eficiente ao utilizar como processo de desalcoolização a evaporação centrífuga (SCC), e posterior injeção dos aromas retidos por pervaporação (CATARINO; FERREIRA; MENDES, 2009; CATARINO; MENDES, 2011).

#### 2.5.3.3 Destilação Osmótica

Destilação osmótica é um processo térmico de separação por membranas em que a membrana não se envolve diretamente na separação, mas age como uma barreira entre duas fases. A seletividade é determinada pelo equilíbrio líquido-vapor, onde o componente com a maior pressão parcial possui a maior taxa de permeação (MULDER, 1996). Uma diferença de temperatura aplicada menor que 2 °C é responsável pelo fornecimento de calor latente de vaporização aos componentes, permitindo a sua vaporização e a passagem através da membrana (HOGAN *et al.*, 1998).

No caso da desalcoolização de cerveja, esta é colocada em contato com a superfície da membrana semipermeável hidrofóbica a temperatura e pressão ambiente, enquanto, no outro lado da membrana porosa, uma solução extratora flui em modo contracorrente (MANGINDAAN; KHOIRUDDIN; WENTEN, 2018). Um exemplo esquemático de desalcoolização (do vinho) utilizando destilação osmótica é apresentado na Figura 2.4.

**Figura 2.4:** Diagrama esquemático do processo de desalcoolização do vinho utilizando destilação osmótica.



Adaptado de Müller *et al.* (2017).

Esse método de separação é energeticamente eficiente comparado a outros métodos, como osmose inversa e destilação. Algumas das vantagens são a retenção teórica de 100 % dos íons, colóides, células biológicas e componentes não voláteis, baixas pressões e temperaturas de operação, menos interação entre membrana e fluidos, e boas propriedades mecânicas da membrana. Porém, uma de suas limitações é que a solução de alimentação necessita ser diluída o suficiente para evitar o umedecimento da membrana (PURWASASMITA *et al.*, 2015).

#### 2.5.3.4 Osmose Inversa

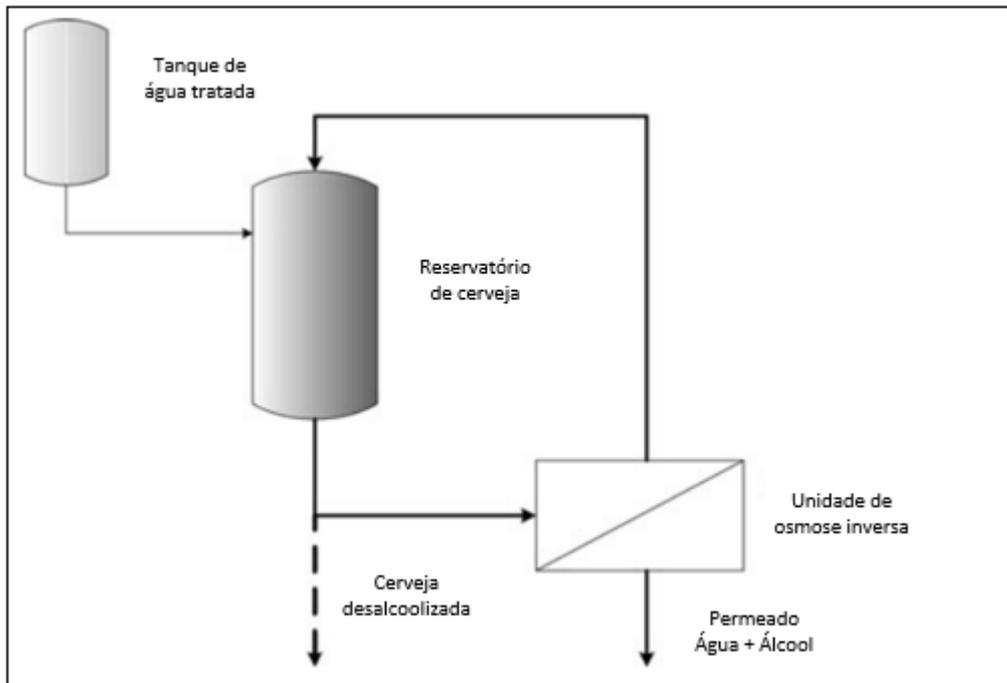
A osmose inversa consiste na separação de solutos de baixa massa molar do solvente aplicando como força-motriz uma pressão hidráulica significativamente maior que a pressão osmótica da solução. O processo é definido como o fluxo de solvente de um meio menos concentrado para um mais concentrado, buscando alcançar o equilíbrio osmótico entre as duas soluções (MESCHIA, G., & SETNIKAR, 1958).

Nesse método, uma membrana semipermeável densa (poros < 2 nm) é utilizada, resultando em uma separação mais seletiva, às custas de menores fluxos e, conseqüentemente, maiores pressões quando comparado aos demais processos que utilizam o gradiente de pressão como força motriz (microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração) (JOHNSON; NGUYEN, 2017).

No caso da desalcoolização, tanto de cervejas quanto de vinhos, ao aplicar a pressão na bebida, a água e o álcool e mais alguns poucos compostos permeiam através da membrana, enquanto o restante dos compostos é retido. A membrana de osmose inversa para desalcoolização precisa, principalmente, ter alta permeabilidade ao etanol e água, baixa permeabilidade aos outros componentes da cerveja, ser química e mecanicamente resistente e ter resistência à temperatura (BRÁNYIK *et al.*, 2012).

A osmose inversa geralmente ocorre no modo de diafiltração, que consiste que o concentrado seja passado novamente pelo processo algumas vezes para que a remoção do álcool seja completa, enquanto o permeado é removido. Porém durante os processos é perdida muita água, o que faz com que seja necessário repor essa água perdida, o que caracteriza o modo de diafiltração. Essa água de reposição precisa ser desmineralizada (condutividade elétrica < 50  $\mu$ S) e desaerada (teor de oxigênio < 0,1 ppm), além de ser necessário realizar carbonatação após o processo de osmose inversa (HODENBERG, 1991). Um esquema da desalcoolização da cerveja por osmose inversa é apresentado na Figura 2.5.

**Figura 2.5:** Diagrama esquemático do processo de desalcoholização da cerveja utilizando osmose inversa.



Adaptado de Ambrosi, Cardozo e Tessaro ( 2014).

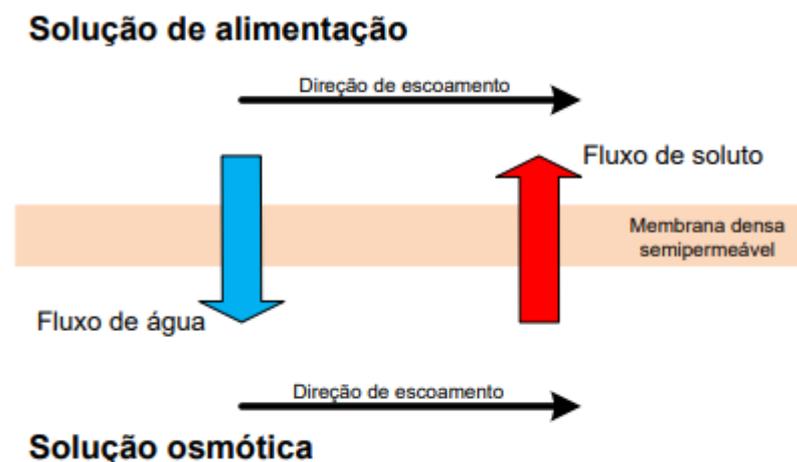
A osmose inversa quando operada em modo de diafiltração e a baixas temperaturas é efetiva para a produção de cerveja não alcoólica, contendo menos de 0,5 vol.% e com elevado conteúdo de aromas. No entanto, o processo apresenta algumas limitações, como o alto consumo de energia, a necessidade de um sistema de resfriamento, pois o bombeamento à alta pressão aumenta a temperatura da cerveja, a perda de compostos voláteis como alguns álcoois e ésteres devido à seletividade imperfeita das membranas (KAVANAGH *et al.*, 1991), a necessidade da reinjeção de dióxido de carbono que permeia, além disso, os compostos da cerveja podem incrustar a membrana (AMBROSI; CARDOZO; TESSARO, 2014). Pilipovik e Riverol ( 2005) mostraram que com osmose inversa somente é possível remover álcool até a concentração de 0,45 vol.%, reduzir além dessa concentração mostrou ser economicamente inviável.

#### 2.5.3.5 Osmose Direta

A osmose direta é um processo que ocorre quando duas soluções de diferentes concentrações estão separadas por uma membrana semipermeável, e possui como força-

motriz o gradiente de potencial químico - expresso em termos de diferença de pressão osmótica através da membrana. As soluções são chamadas de solução de alimentação (SA), de baixa pressão osmótica, e solução osmótica (SO), de pressão osmótica elevada. Devido ao gradiente de concentração, água flui da alimentação para a solução osmótica, como mostrado na Figura 2.6. O processo pode ocorrer de forma co-corrente, ou contracorrente, e em ambas as soluções percorrem a superfície da membrana de forma tangencial, a fim de evitar incrustações.

**Figura 2.6:** Desenho esquemático de um processo de osmose direta em modo co-corrente.



Para a desalcoolização da cerveja, a osmose direta apresenta diversas vantagens, como a operação em baixa pressão, baixa tendência de incrustação da membrana, alta rejeição a diversos agentes contaminantes, e gasto energético teoricamente menor por não ser utilizado altas pressões (CATH; CHILDRESS; ELIMELECH, 2006). Além disso, é possível obter pressões osmóticas muito elevadas utilizando soluções osmóticas específicas em comparação à pressão hidráulica da osmose inversa, o que contribui para uma permeação mais rápida da água (AMBROSI *et al.*, 2018).

Em contrapartida, algumas das limitações da osmose direta são, principalmente, a polarização por concentração (CATH; CHILDRESS; ELIMELECH, 2006), fenômeno em que os efeitos de concentração de soluto que ocorrem próximo à superfície da membrana acabam promovendo uma camada extra de resistência, reduzindo a real força motriz do processo. Na osmose direta, essa polarização ocorre tanto externa quanto internamente à membrana,

influenciando no processo (AMBROSI, 2016). Outra limitação existente é a passagem de soluto da solução osmótica para a solução de alimentação. Para superar essa limitação é necessário o desenvolvimento de membranas de osmose direta que permitam elevados fluxos de etanol e água, ao mesmo tempo baixos fluxos de soluto da SO e dos demais compostos da cerveja.

### **3 Metodologia**

No presente estudo foi realizada uma revisão da literatura para identificar pesquisas que utilizaram processos de separação por membranas para desalcoolização de cervejas, bem como avaliar as técnicas e resultados obtidos pelos diversos processos.

A busca bibliográfica foi realizada no período de março a abril de 2021, nas bases de dados Science Direct, Scopus e nas bibliotecas eletrônicas Periódicos Capes e Google Acadêmico. Foi utilizada como estratégia de busca a combinação dos seguintes descritores nos idiomas português e inglês: desalcoolização de cerveja, remoção de álcool da cerveja, diálise, destilação osmótica, pervaporação, osmose inversa, osmose direta. Foram incluídos no estudo artigos disponíveis na íntegra, publicados em português ou inglês.

Foi realizada uma seleção a partir da leitura de título e resumo. Foram selecionados apenas artigos de pesquisas científicas que trataram do uso de membranas para desalcoolização de cervejas e artigos que utilizaram membranas para outro processo em conjunto com desalcoolização de cervejas, como por exemplo, a recuperação de aromas por pervaporação.

A partir dos artigos incluídos nesta revisão foi realizada a análise e a integração das informações obtidas. Além disso, buscou-se também algumas referências citadas nestes artigos para aprofundar o assunto tratado.

## 4 Resultados e Discussão

No presente capítulo serão apresentados, primeiramente, os resultados das pesquisas realizadas na literatura, seguidos de uma discussão mais detalhada sobre esses trabalhos. Além disso, uma análise comparativa qualitativa também é realizada, a fim de demonstrar a competitividade desses processos quanto ao processo de desalcoolização de cervejas.

### 4.1 Artigos selecionados

Utilizando a metodologia indicada no capítulo anterior, inicialmente foi identificado um grande número de resultados nas bases de dados conforme apresentado na Tabela 1, no entanto, a maior parte dos resultados apontava artigos que não cobriam o tema do trabalho, ou apenas citavam brevemente o assunto. Com isso, uma análise mais criteriosa foi realizada artigo por artigo a fim de selecionar as pesquisas científicas mais pertinentes ao assunto.

**Tabela 1:** Síntese da busca inicial nas bases de dados e bibliotecas eletrônicas.

DESCRITORES	BASE DE DADOS			
	Google Scholar	Science Direct	Scopus	Capes
Remoção de álcool da cerveja	135.000	11.410	4.099	6.155
Desalcoolização de cerveja	1.630	279	218	73
"Desalcoolização de cerveja" diálise	414	57	33	13
"Desalcoolização de cerveja" destilação osmótica	366	59	75	28
"Desalcoolização de cerveja" pervaporação	279	81	101	16
"Desalcoolização de cerveja" osmose inversa	373	102	120	37
"Desalcoolização de cerveja" osmose direta	82	18	18	5

Um total de 14 artigos foram selecionados, sendo que os processos de destilação osmótica e osmose inversa foram aqueles com maior representatividade entre o total de documentos escolhidos. O processo de osmose inversa já é utilizado hoje na indústria para a produção de bebidas desalcoolizada, o que mostra o porquê ser um dos mais estudados para esse assunto. A destilação osmótica é um processo que vem sendo amplamente estudado recentemente, cujos resultados aparentam ser promissores para o processo de desalcoolização

Na Tabela 2 estão listados os estudos selecionados que utilizaram membranas como forma de desalcolização da cerveja. Estão resumidos os processos utilizados, o tipo de membrana, o tipo de cerveja, a área superficial de membrana e a porcentagem de remoção do etanol para cada referência.

**Tabela 2:** Estudos que utilizaram processo de separação por membranas para desalcoolização de cerveja.

Processo	Tipo de Membrana	Tipo de Cerveja (vol.% etanol)	Remoção Etanol (%)	Área de Membrana (m <sup>2</sup> )	Referência
<b>Diálise</b>	Membrana de fibra oca de cuprofane	Cerveja alcoólica normal (6,29)	39	90	(MOONEN; NIEFIND, 1982)
<b>Diálise</b>	Membrana de fibra oca de cuprofane	Lager (3,8)	36	1,3	(LESKOSEK; MITROVIC, 1994)
<b>Diálise</b>	Membrana de fibra oca feita de derivados de celulose e plásticos.	Vollbier Pilsner (4,8)	90	-	(ZUFALL; WACKERBAUER, 2000)
<b>Pervaporação</b>	Membrana de Polidimetilsiloxano (PDMS) preenchida com zeólitas hidrofóbicas	Cerveja alcoólica normal (-)	50 90	-	(BRÜSCHKE, 1990)
<b>Destilação Osmótica</b>	Membrana de polipropileno	Lager clara (4,95)	91	0,18	(RUSSO <i>et al.</i> , 2013)
<b>Destilação Osmótica</b>	Membrana de fibra oca de Polipropileno	Lager (5,0)	81	0,54	(DE FRANCESCO <i>et al.</i> , 2014)
<b>Destilação Osmótica</b>	Membrana de fibra oca de Polipropileno	Lager (4,95)	91	0,18	(LIGUORI <i>et al.</i> , 2015)
<b>Destilação Osmótica</b>	Membrana não porosa enrolada em espiral de Poliamida-Polisulfona	Lager clara (Anker Beer da PT Delta Djakarta Tbk) (5)	26 (2,5h) 51 (6h)	0,37	(PURWASASMITA <i>et al.</i> , 2015)

Tabela 2 - Continuação

Processo	Tipo de Membrana	Tipo de Cerveja (vol.% etanol)	Remoção Etanol (%)	Área de Membrana (m <sup>2</sup> )	Referência
Destilação Osmótica	Membrana de fibra oca de Polipropileno	Bitter (amarga) (3,6)	81	0,18	(LIGUORI <i>et al.</i> , 2016)
Destilação Osmótica	Membrana de fibra oca de Polipropileno	Weiss (5,7)	82	0,18	(LIGUORI <i>et al.</i> , 2016)
Osmose Inversa	Membrana de osmose semipermeável suportada por material poroso selada com epóxi especial ou adesivo de poliuretano	Cerveja alcoólica normal caseira (6,0)	93	-	(PILIPOVIK; RIVEROL, 2005)
Osmose Inversa	Membrana de acetato de celulose (200 MWCO - Alfa Laval)	Cerveja alcoólica normal (5,5)	63	0,0155	(CATARINO <i>et al.</i> , 2006)
Osmose Inversa	Mistura de triacetato e diacetato de celulose em poliéster	Cerveja alcoólica normal (5,5)	91	0,0155	(CATARINO <i>et al.</i> , 2007)
Osmose Inversa	Membrana de osmose composta de poliestersulfona em configuração espiral	Stout (3,3)	100	0,3	(ALCANTARA <i>et al.</i> , 2016)
Osmose Direta	Membrana plana de Triacetato de celulose	Cerveja comercial embarrilada (5,2)	90	0,002	(AMBROSI <i>et al.</i> , 2020)

A seguir são apresentadas as Tabelas de 3 a 7 separadas em cada processo para desalcoolização da cerveja, onde estão discriminados os tipos de membrana, tipos de cerveja, condições de operação, concentrações de etanol, agentes removedores (quando existentes) e fluxos de permeado, com algumas observações relevantes de cada artigo.

**Tabela 3:** Estudos que utilizaram diálise como processo para desalcoolização de cerveja.

Referência	%vol. Etanol inicial	%vol. Etanol final	T op. (°C)	P op. (bar)	Agente Removedor	Observações e Recomendações
(MOONEN; NIEFIND, 1982)	6,29	3,81	5	3,2	Água	Gosto do produto inicial é mantido, não há perdas de dióxido de carbono, caso a água seja enriquecida com CO <sub>2</sub> . Não é necessária diluição nem concentração. Comparado à destilação, o produto possui sabor melhor devido à utilização de temperaturas baixas (~5 °C), não degradando o produto.
(LESKOSEK; MITROVIC, 1994)	3,8	2,432	5	1	Água	Devido à estrutura multicomponente da cerveja e às inúmeras interações que ocorrem na camada limite e no material da membrana, todos os sistemas cerveja/membrana devem de ser testados a fim de encontrar as melhores condições de operação. Quaisquer mudanças na composição da cerveja podem afetar a compatibilidade com a membrana, a transferência de massa, a seletividade e a eficiência.
(ZUFALL; WACKERBAUER, 2000)	4,8	0,47	-	-	Água	Apesar das qualidades sensoriais serem excelentes, o produto não atinge a qualidade da cerveja original devido à perda de aromas.

**Tabela 4:** Estudos que utilizaram pervaporação como processo para desalcoolização de cerveja.

Referência	% Remoção Etanol	T op. (°C)	Observações e Recomendações
(BRÜSCHKE, 1990)	50	35 a 70	Entre 20 e 50 % de remoção de etanol, as características organolépticas do produto não são afetadas.
(BRÜSCHKE, 1990)	90	35 a 70	Acima de 90 % de remoção de etanol, há significativas perdas de aromas. Membranas até então não discriminam significativamente etanol de outros compostos orgânicos voláteis.

**Tabela 5:** Estudos que utilizaram destilação osmótica como processo para desalcoolização de cerveja.

Referência	%vol. Etanol inicial	%vol. Etanol final	T op. (°C)	P op. (bar)	Agente Removedor	Fluxo de etanol (L/m <sup>2</sup> h)	Observações e Recomendações
(RUSSO <i>et al.</i> , 2013)	4,95	0,47	10	1	Água/Soluções alcoólicas (permeados)	~0,05	Utilização de permeado como agente removedor minimiza consumo de água. Características de cor, pH, polifenóis, e atividade antioxidante não sofreram alterações. Necessário realizar estudo dos perfis de aroma da cerveja desalcoolizada.
(DE FRANCESCO <i>et al.</i> , 2014)	5	0,94	10	-	Água desaerada/ Água carbonada	-	Componentes voláteis foram significativamente perdidos, porém estabilidade da espuma e avaliação do sabor não foram feitas, o que são considerados pontos fracos da desalcoolização. O fluxo da solução removedora não afetou o resultado, e os diferentes agentes removedores também não influenciaram.
(LIGUORI <i>et al.</i> , 2015)	4,95	0,46	10	-	Água/Soluções alcoólicas (permeados)	~0,031	Uma perda significativa de compostos voláteis foi observada, 77 % de álcoois complexos, 99 % de ésteres e 93 % de aldeídos, respectivamente.

Tabela 5 - Continuação

Referência	%vol. Etanol inicial	%vol. Etanol final	T op. (°C)	P op. (bar)	Agente Removedor	Fluxo de etanol (L/m <sup>2</sup> h)	Observações e Recomendações
(PURWASASMITA <i>et al.</i> , 2015)	5	3,7 (2,5 h) 2,45 (6 h)	4	0,58 (vácuo)	Água	0,032	Desalcoolização pode ocorrer sem perda de glicerol e maltose, porém ainda é necessária análise das características sensoriais e de outros componentes da cerveja.
(LIGUORI <i>et al.</i> , 2016)	3,6 Bitter	0,7	10	1,1	Cerveja original diluída e permeados	-	Para evitar perda de CO <sub>2</sub> , foi utilizado como agente removedor a cerveja diluída com e sem adição e dióxido de carbono, e ainda se mostrou necessária a reinjeção de CO <sub>2</sub> antes do engarrafamento. Características como cor, amargor, polifenóis, e atividade antioxidante se mostraram inalteradas, apenas houve perda significativa de álcoois complexos e ésteres.
(LIGUORI <i>et al.</i> , 2016)	5,7 Weiss	1	10	1,1	Cerveja original diluída e permeados	-	

Tabela 6: Estudos que utilizaram osmose inversa como processo para desalcoolização de cerveja.

Referência	%vol. Etanol inicial	%vol. Etanol final	T op. (°C)	P op. (bar)	Fluxo de permeado (L/m <sup>2</sup> h)	Observações e Recomendações
(PILIPOVIK; RIVEROL, 2005)	6	0,5	0	50	-	Foi observada uma diminuição nos conteúdos de carboidrato e extrato quando utilizada alimentação não diluída. O autor recomenda a diluição da solução alcoólica inicial, a fim de manter os níveis de conteúdo de carboidratos, porcentagem de extrato e sais em um intervalo aceitável, sem alteração da qualidade e sabor do produto.
(CATARINO <i>et al.</i> , 2006)	5,49	2,03	5	40	14,168	Foram estudadas diversas condições e as melhores encontradas foram de 5 °C. As membranas se tornam mais efetivas a baixas temperaturas, aumentando a rejeição aos aromas, e utilizando as maiores pressões, pois obtém um perfil de aromas melhor.

**Tabela 6 - Continuação**

Referência	%vol. Etanol inicial	%vol. Etanol final	T op. (°C)	P op. (bar)	Fluxo de permeado (L/m <sup>2</sup> h)	Observações e Recomendações
(CATARINO <i>et al.</i> , 2007)	5,4	0,49	5	40	23,09	Foram estudadas 6 membranas diferentes, sendo a membrana feita por uma mistura de triacetato e diacetato de celulose em poliéster utilizada para esses resultados, pois demonstrou maiores fluxos de permeado e menor rejeição ao etanol. Altas pressões e baixas temperaturas influenciam positivamente o processo, e a elevada velocidade da corrente de alimentação reduz a polarização por concentração.
(ALCANTARA <i>et al.</i> , 2016)	3,3	0	20	4,9	~7	Foram estudadas temperaturas de 20 e 30 °C, com e sem diluição, sendo os experimentos com a menor temperatura e com diluição os que obtiveram os melhores resultados de cor, amargor, pH e antioxidantes quando comparados à cerveja original. Estudos de condições ideais de temperatura e pressão são necessários, além de análise sensorial detalhada.

**Tabela 7:** Estudos que utilizaram osmose direta como processo para desalcoolização de cerveja.

Referência	%vol. Etanol inicial	%vol. Etanol final	T op. (°C)	P op. (bar)	Agente Osmótico	Fluxo de permeado total (kg/m <sup>2</sup> h)	Observações e Recomendações
(AMBROSI <i>et al.</i> , 2020)	5,16 ± 0,23	0,5 ± 0,03	15	1	MgCl <sub>2</sub>	11 ± 0,44	Características da cerveja obtida diferentes da tradicional, houve alterações na turbidez, condutividade elétrica e perfil de aromas. Membrana mais apropriada para estudo foi a de triacetato de celulose, por apresentar menor fluxo inverso de soluto, e menor rejeição ao etanol. Cloreto de magnésio escolhido como agente osmótico por possuir menor fluxo inverso de soluto e maior fluxo permeado total. Altas concentrações e altas velocidades de escoamento levaram a maiores fluxos de permeado total e inverso de soluto.

## 4.2 Discussão

De modo geral, observa-se que os processos de separação por membranas podem ser utilizados como um eficiente método para desalcoholização de cervejas. Entre as vantagens específicas para a remoção de etanol de bebidas destacam-se: operação em baixas temperaturas, evitando danos térmicos no produto, baixo consumo energético e a necessidade de pouco ou nenhum aditivo químico para realizar a remoção.

### 4.2.1 Diálise

Para os processos de diálise, foi observado por Leskosek e Mitrovic (1994) que para cada sistema é necessário realizar experimentos para determinação dos parâmetros ótimos de operação, pois quaisquer mudanças na composição da cerveja podem influenciar diversos outros fatores, como compatibilidade com membrana, transferência de massa, seletividade e eficiência. Pode-se observar que para as publicações mais antigas, a remoção de etanol alcançou até 40 %, onde não houve perdas de sabor e aroma. Entretanto, em estudos mais recentes, ao atingir remoções de 90 % de etanol, os autores constataram que as características organolépticas do produto final eram distintas da cerveja antes do processo.

Os estudos de DI mostram que é possível obter um produto livre de álcool e de boas características sensoriais, além de não precisar diluição nem concentração da cerveja. Além disso, não é necessária adição de dióxido de carbono caso seja utilizada água enriquecida com CO<sub>2</sub>. No entanto, as características não são iguais ao produto original, devido à perda de etanol e de alguns aromas. Comparado ao processo de evaporação a vácuo, o processo tende a ser mais caro, principalmente devido aos maiores custos de manutenção de membranas e altas pressões das bombas (ZUFALL; WACKERBAUER, 2000), além disso, é muito difícil replicar em larga escala devido aos baixos fluxos, tornando o processo não competitivo (AMBROSI *et al.*, 2020).

### 4.2.2 Pervaporação

Aplicando o processo de pervaporação, Brüscke (1990) analisou que, para remoções de etanol entre 25 e 50 %, a cerveja não apresentava nenhuma perda de características organolépticas, porém ao aumentar a remoção de álcool, essas características começavam a ser perdidas, sendo significativas acima de 90 % de remoção. O principal fator para essas

perdas é devido ao fato de as membranas produzidas até a época não apresentarem boa discriminação entre etanol e outros compostos voláteis. Ainda, o processo apresenta um alto consumo energético.

Em estudos posteriores, verificou-se que a utilização da pervaporação para retenção de aromas era muito mais viável que para o processo de desalcoolização em si (CATARINO; MENDES, 2011). Foi observado que membranas de PV adequadas são bastante seletivas para diversos grupos químicos que constituem perfis de aroma típicos de bebidas (SAMPRANPIBOON *et al.*, 2000; SHEPHERD; HABERT; BORGES, 2002).

A pervaporação foi utilizada com sucesso para retenção de aromas e posterior reinjeção na bebida em diversos estudos. Concentração de sucos por evaporação, desalcoolização de bebidas por evaporação centrífuga são alguns dos métodos que utilizaram PV para retenção do aroma previamente, para reinjeção após o processo (BÖRJESSON; KARLSSON; TRÄGÅRDH, 1996; CATARINO; MENDES, 2011; KARLSSON; TRÄGÅRDH, 1997). Alguns outros estudos sobre recuperação de aromas foram feitos por (PEREIRA, C C *et al.*, 2005; PEREIRA, Cristina C *et al.*, 2006; SCHÄFER; CRESPO, 2007), existindo ainda diversos outros artigos na literatura que tratam desse assunto.

#### 4.2.3 Destilação Osmótica

O processo de destilação osmótica, com remoção de até 50 % de etanol, foi analisado por Purwasasmita *et al.* (2015). Os autores observaram que a desalcoolização ocorre sem a perda de glicerol e maltose, porém não foram realizadas análises das características sensoriais e de outros compostos da cerveja. Foi constatado também que o fluxo permeado através da membrana é amplificado com o aumento da pressão de alimentação e com a pressão de vácuo, devido à maior permeabilidade. No entanto, há uma redução na seletividade da membrana com o aumento da pressão de vácuo.

Nos outros artigos de DO avaliados, os agentes removedores utilizados foram soluções alcoólicas, os permeados do processo, água carbonatada e até mesmo a própria cerveja diluída. A utilização dos permeados e da cerveja diluída como agentes removedores é possível, pois apresentam baixo teor alcoólico, mantendo uma alta força matriz, ao mesmo tempo que reduzem o consumo de água. Além disso, o processo foi mantido até que a remoção alcançasse valores superiores a 80 % do etanol inicial, e em todos os casos, foi observada uma perda significativa de compostos como ésteres, álcoois complexos e aldeídos, que são os

compostos associados ao aroma da cerveja. Outras características como cor, amargor, polifenóis, e atividade antioxidante não apresentaram alterações. As membranas mais utilizadas nos processos de destilação osmótica, apresentadas na literatura, foram as de polipropileno em módulo de fibra oca, sendo o processo conduzido em temperaturas baixas e pressão atmosférica.

#### 4.2.4 *Osmose Inversa*

Os resultados apresentados nos estudos selecionados de osmose inversa demonstraram que o processo é bastante eficaz, com remoções de etanol bastante elevadas, com exceção do estudo de Catarino *et al.* (2006) que avaliou principalmente as melhores condições de operação e diferentes tipos de membranas nos resultados da desalcoolização. Nesse estudo, os melhores parâmetros encontrados foram a máxima pressão que a membrana pode suportar, intensificando o fluxo de permeado e melhores perfis de aroma, com uma temperatura ótima de 5 °C. Nessas condições os autores verificaram que as membranas apresentaram maiores rejeições aos compostos de aromas.

Nos demais estudos, outros pontos foram levantados, como a diluição da alimentação, e altas vazões da solução de alimentação, a fim de evitar a polarização por concentração. Alcantara *et al.* (2016) estudaram a influência da diluição da solução de alimentação, porém utilizando temperaturas mais elevadas que o recomendado na literatura, de 20 e 30 °C, concluindo que o processo conduzido com a solução diluída e à baixas temperaturas apresentou melhores resultados de desalcoolização, o que vai de encontro com a literatura. Catarino *et al.* (2007) também obtiveram resultados promissores, primeiramente realizaram um estudo para obter as melhores condições de operação e a melhor membrana ser utilizada; com esses parâmetros definidos como as condições ótimos, realizaram experimentos, obtendo uma remoção de mais de 90 % do etanol inicial, mantendo alto conteúdo de aromas na cerveja final. No entanto, em nenhum estudo foi realizado uma avaliação mais precisa das características sensoriais.

#### 4.2.5 *Osmose Direta*

Na osmose direta, Ambrosi *et al.* (2020) verificaram que o processo de desalcoolização é efetivo, no entanto alguns fatores como turbidez, salinidade e cor são afetados, o que influencia as características organolépticas do produto. Além disso, foi percebido uma grande

perda de compostos de aroma durante o processo e também para o ambiente, devido a questões operacionais. A membrana escolhida no estudo foi a de triacetato de celulose, por apresentar menores rejeições ao etanol, e menores fluxos inversos de soluto, além de ter sido desenvolvida para minimizar os efeitos de polarização por concentração. Ademais, alguns parâmetros foram estudados, concluindo que altas concentrações e altas velocidades de escoamento levam a maiores fluxos de permeado e fluxo inverso de soluto. Para o aprimoramento da técnica é necessário que ainda sejam estudados os parâmetros ótimos de operação, como velocidade de escoamento, tipo e concentração do agente osmótico e temperatura, e a quantificação das incrustações a longo prazo de operação.

A OD ainda apresenta poucos estudos na literatura quanto à desalcoolização de cerveja, principalmente devido ao fato de existirem apenas dois tipos de membranas comerciais e o seu desenvolvimento e fabricação são direcionados a aplicações especificamente relacionadas à recuperação/extração de água, limitando a escolha das membranas para outras aplicações com objetivos diferentes. O desenvolvimento de novas membranas de osmose direta com baixa rejeição ao etanol e com alta rejeição aos solutos da solução osmótica, a fim de evitar o fluxo inverso, se torna essencial para o aprimoramento da técnica.

### **Análise comparativa dos diferentes processos**

Para a diálise, remoções de etanol de até 40 % não influenciaram as características da cerveja, porém ao remover até 90 % de álcool, ocorreram perdas de compostos de aroma; as membranas mais utilizadas são de cuprofone em módulo de fibra oca, água como agente removedor e temperaturas baixas de operação. Para pervaporação, apenas um estudo sobre desalcoolização de cerveja foi encontrado, mostrando que para remoções até 50 % não ocorriam perdas de aromas, porém com remoções altas, as características eram afetadas, muito semelhante aos resultados de diálise. Membrana de PDMS preenchida com zeólitas hidrofóbicas, vapor de água no lado permeado e temperaturas variando entre 35 e 70 °C foram utilizadas nos experimentos.

Já para a destilação osmótica, os estudos apresentavam materiais e condições de operação semelhantes, sendo as membranas de polipropileno em fibra oca as mais utilizadas, com pressão ambiente e temperaturas baixas. Além disso, como substitutos para a água, os agentes removedores testados foram a própria cerveja diluída, ou o permeado do processo,

a fim de minimizar o consumo de água. As remoções de etanol obtidas na maioria dos estudos foram superiores a 80 %, com perda de álcoois complexos, ésteres e aldeídos.

Na osmose inversa, os resultados de remoção encontrados foram bastante elevados, com os melhores parâmetros encontrados sendo temperatura baixas, perto de 5 °C, as maiores pressões que a membrana ou o sistema puderem suportar, e também a diluição do produto original. Porém, não foram avaliadas as características sensoriais do produto final, que podem ter sido alteradas durante o processo. As membranas utilizadas nos estudos foram bastante variadas, sendo elas de acetato de celulose; triacetato e diacetato de celulose em poliéster; e poliestersulfona.

Por fim, a osmose direta é um processo não muito utilizado ainda no campo de desalcoholização de cerveja, porém os resultados encontrados por Ambrosi *et al.* (2020) foram de altas remoções de etanol, até 0,5 %, utilizando membranas de triacetato de celulose, e cloreto de magnésio como solução osmótica. No entanto, foi percebido um aumento de soluto no produto final, além de mudanças na turbidez e cor, e uma elevada perda de compostos de aroma.

Uma comparação qualitativa entre os processos é apresentada na Tabela 8. São apresentados os módulos e membranas mais utilizados, se o processo é competitivo para desalcoholização de cervejas, ampliável para larga escala, como também algumas sugestões do que seria necessário desenvolver e pesquisar para que o processo possa ser competitivo na remoção de etanol de cervejas.

**Tabela 8:** Comparação qualitativa dos processos de separação de membranas para desalcoolização de cervejas.

Processo	Tipo de membrana e módulo mais utilizados	Processo competitivo para desalcoolização de cervejas?	Processo ampliável para larga escala?	O que precisa ser desenvolvido?
Diálise	Membrana de cuprofane em fibra oca	Sim	Não, fluxos baixos, processo caro	Membranas mais seletivas e sistemas/membranas que permitam maiores fluxos
Pervaporação	Membrana de Polidimetilsiloxano (PDMS) preenchida com zeólitas hidrofóbicas	Não, melhor para remoção e concentração de aromas	-	-
Destilação osmótica	Membrana de fibra oca de Polipropileno	Sim	Sim	Membranas mais seletivas ao etanol
Osmose Inversa	Membranas com camada seletiva geralmente de acetato de celulose, poliamida ou poliimida, em módulos de diferentes arranjos (plano, tubular, espiral)	Sim	Sim, porém o custo de produção é alto devido às altas pressões	Sistemas/configurações que diminuam o <i>fouling</i> e gastos energéticos
Osmose Direta	Membrana plana de Triacetato de Celulose	Sim	Sim	Membranas mais seletivas aos compostos de aroma e soluto. Sistemas e configurações diferentes

## 5 Considerações Finais

Neste trabalho foi realizada uma revisão de literatura para estudar a desalcoolização de cervejas utilizando processos de separação por membranas. Foram avaliados artigos de cinco diferentes processos de separação, e comparados os resultados quanto à desalcoolização, parâmetros de operação e características do produto final.

Embora seja difícil fazer uma comparação direta entre processos diferentes, os resultados obtidos são bastante similares, em estudos onde houve uma remoção de etanol o suficiente para caracterizar a cerveja como não alcoólica, ocorreu também a perda significativa de compostos voláteis, os chamados compostos de aroma, afetando as características organolépticas do produto final. Em alguns estudos essas características não foram avaliadas.

Em geral, os processos são competitivos para a desalcoolização de cervejas, exceto a pervaporação, que é amplamente utilizada para remoção e concentração de aromas. Os processos de DI, DO e OD apresentam perdas significativas de compostos de aroma, enquanto a OI apresenta alto conteúdo de aromas ao final do processo, no entanto, apresenta alto consumo energético e alto potencial de incrustação devido às altas pressões aplicadas. Quanto a um possível *scale-up*, apenas a DI apresenta baixo potencial, pois, segundo autores, apresenta fluxos de etanol muito baixos, o que faz com que o processo não seja competitivo para replicar em larga escala.

Com os processos existentes hoje, algumas alternativas para a desalcoolização da cerveja, sem (ou com pouca) perda de compostos de aroma, destacam-se: a osmose inversa, que é um processo um pouco mais caro que já é utilizado na indústria e apresenta bons resultados; ou também a combinação de dois diferentes métodos para alcançar as características do produto desejado, como por exemplo, a utilização de OD ou DO, processos mais baratos, combinado com a pervaporação para retenção de aromas, um processo um pouco mais caro. O emprego da PV para reter aromas antes da desalcoolização, e reinjeção após o processo de desalcoolização por OD ou DO, por exemplo, pode resultar em características da cerveja final bastante similares ao produto original.

Finalmente, constatou-se que para haver uma melhoria do desempenho dos PSM na desalcoolização da cerveja, o essencial é que sejam desenvolvidas membranas seletivas próprias para cada processo, porém também é muito importante a criação e/ou avaliação de outras configurações de sistemas de desalcoolização, como por exemplo, diversos ciclos de remoção, diafiltração, entre outros. Além disso, a otimização de parâmetros de operação de cada sistema deve ser feita a fim de melhorar a eficiência do processo.

## REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, B. M. *et al.* Assessment of quality and production process of a non-alcoholic stout beer using reverse osmosis. **Journal of the Institute of Brewing**, [s. l.], v. 122, n. 4, p. 714–718, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1002/jib.368>
- AMBROSI, A. *et al.* Beer dealcoholization by forward osmosis diafiltration. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], v. 63, n. August 2019, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102371>
- AMBROSI, A. **Desalcoolização de cerveja – Avaliação da remoção de etanol de soluções aquosas por osmose direta**. 2016. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [s. l.], 2016.
- AMBROSI, A. *et al.* Transport of Components in the Separation of Ethanol from Aqueous Dilute Solutions by Forward Osmosis. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 57, n. 8, p. 2967–2975, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04944>
- AMBROSI, A.; CARDOZO, N. S. M.; TESSARO, I. C. Membrane Separation Processes for the Beer Industry: A Review and State of the Art. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 921–936, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1275-0>
- BÖRJESSON, J.; KARLSSON, H. O. E.; TRÄGÅRDH, G. Pervaporation of a model apple juice aroma solution: comparison of membrane performance. **Journal of Membrane Science**, [s. l.], v. 119, n. 2, p. 229–239, 1996. Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0376-7388\(96\)00123-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0376-7388(96)00123-8)
- BRÁNYIK, T. *et al.* A review of methods of low alcohol and alcohol-free beer production. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 108, n. 4, p. 493–506, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.020>
- BRIGGS, D. *et al.* **Brewing Science and practice**. 1st. ed. [S. l.]: CRC Press, 2004.
- BRÜSCHKE, H. E. A. Removal of ethanol from aqueous streams by pervaporation. **Desalination**, [s. l.], v. 77, n. C, p. 323–330, 1990. Available at: [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(90\)85032-6](https://doi.org/10.1016/0011-9164(90)85032-6)
- CATARINO, M. *et al.* Alcohol removal from beer by reverse osmosis. **Separation Science and Technology**, [s. l.], v. 42, n. 13, p. 3011–3027, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1080/01496390701560223>
- CATARINO, M. *et al.* Beer dealcoholization by reverse osmosis. **Desalination**, [s. l.], v. 200, n. 1–3, p. 397–399, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.346>
- CATARINO, M. Production of non-alcoholic beer with reincorporation of original compounds. [s. l.], p. 259, 2010.
- CATARINO, M.; FERREIRA, A.; MENDES, A. Study and optimization of aroma recovery from beer by pervaporation. **Journal of Membrane Science**, [s. l.], v. 341, n. 1–2, p. 51–59, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.05.038>
- CATARINO, M.; MENDES, A. Non-alcoholic beer - A new industrial process. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 79, n. 3, p. 342–351, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.03.020>
- CATH, T.; CHILDRESS, A.; ELIMELECH, M. Forward osmosis: Principles, applications, and

recent developments. **Journal of Membrane Science**, [s. l.], v. 281, p. 70–87, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.048>

DE FRANCESCO, G. *et al.* Effects of operating conditions during low-alcohol beer production by osmotic distillation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 62, n. 14, p. 3279–3286, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1021/jf405490x>

DE GAETANO, G. *et al.* Effects of moderate beer consumption on health and disease: A consensus document. **Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases**, [s. l.], v. 26, n. 6, p. 443–467, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2016.03.007>

DONHAUSER, S., GLAS, K., MUELLER, O. **Behavior of beer components during the manufacture of alcohol-reduced products by dialysis**. [S. l.: s. n.], 1991.

E.K. LEE, V.J. KALYANI, S. L. M. **Process of treating alcoholic beverages by vapor-arbitrated pervaporation**. US Patent US 5013447. Concessão: 1991.

G. BERREBI, Y. GAILLARD, J.-L. G. **Process for reducing alcohol levels in alcoholic beverages**. US Patent US 6472009. Concessão: 2002.

GÜZEL, N.; GÜZEL, M.; SAVAŞ BAHÇEÇI, K. **Nonalcoholic beer**. [S. l.: s. n.], 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816938-4.00006-9>

HODENBERG, G. W. von. **Production of alcoholfree beers using reverse osmosis**. [S. l.: s. n.], 1991.

HOGAN, P. *et al.* A new option : Osmotic distillation. **Chemical Engineering Progress**, [s. l.], v. 94, p. 49–61, 1998.

HUANG, R. Y. M. **Pervaporation membrane separation processes**. Amsterdam: Elsevier, 1991.

IWSR. **No- and Low-Alcohol Strategic Study**. [S. l.], 2019. Available at: <https://www.theiwsr.com/global-low-and-no-alcohol-strategic-study/>. Acesso em: 27 mar. 2021.

JOHNSON, R. A.; NGUYEN, M. H. **Understanding Membrane Distillation and Osmotic Distillation**. [S. l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2017.

JYOTI, G.; KESHAV, A.; ANANDKUMAR, J. Review on Pervaporation: Theory, Membrane Performance, and Application to Intensification of Esterification Reaction. **Journal of Engineering (United Kingdom)**, [s. l.], v. 2015, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1155/2015/927068>

KARLSSON, H. O. E.; TRÄGÅRDH, G. Aroma Recovery during Beverage Processing. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 159–178, 1997. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00081-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00081-2)

KAVANAGH, T. E. (Carlton and U. B. L. . *et al.* **Volatile flavor compounds in low alcohol beers**. [S. l.: s. n.], 1991.

KIRIN BEER UNIVERSITY. [S. l.], 2019. Available at: [https://www.kirinholdings.co.jp/english/news/2019/1003\\_01.html#anc01](https://www.kirinholdings.co.jp/english/news/2019/1003_01.html#anc01). Acesso em: 24 maio 2021.

KUNZE, W. **Technology Brewing and Malting**. VLB, Berlin, 1999.

- L. TAKÁCS, G. VATAI, K. K. Production of alcohol free wine by pervaporation. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 78, p. 118–125, 2007.
- LESKOSEK, B. I. J.; MITROVIC, M. efficiency and selectivity of the alcohol separation. The. **Journal of the Institute of Brewing**, [s. l.], v. 100, n. January, p. 287–292, 1994.
- LIGUORI, L. *et al.* Production and characterization of alcohol-free beer by membrane process. **Food and Bioproducts Processing**, [s. l.], v. 94, p. 158–168, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.03.003>
- LIGUORI, L. *et al.* Quality Attributes of Low-Alcohol Top-Fermented Beers Produced by Membrane Contactor. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 191–200, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1612-y>
- M.J. LEWIS, T. W. Y. **Brewing**. London: [s. n.], 1995.
- MANGINDAAN, D.; KHOIRUDDIN, K.; WENTEN, I. G. Beverage dealcoholization processes: Past, present, and future. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], v. 71, p. 36–45, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.10.018>
- MARCUSSO, E.; MULLER, C. **A CERVEJA NO BRASIL: O ministério da agricultura informando e esclarecendo**. [S. l.], 2017. Available at: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/publicacoes/a-cerveja-no-brasil-28-08.pdf>. Acesso em: 5 maio 2021.
- MESCHIA, G., & SETNIKAR, I. Experimental study of osmosis through a collodion membrane. **The Journal of General Physiology**, [s. l.], v. 42, p. 429–444, 1958. Available at: <https://doi.org/10.1085/jgp.42.2.429>
- MONTANARI, L. Production of Alcohol-Free Beer. *In*: [S. l.: s. n.], 2009. p. 61–75. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373891-2.00006-7>
- MOONEN, H.; NIEFIND, H. J. Alcohol reduction in beer by means of dialysis. **Desalination**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 327–335, 1982. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)88733-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)88733-0)
- MULDER, M. **Basic principles of membrane technology**. [S. l.]: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- MULLER, C. *et al.* Processes for alcohol-free beer production: A review. **Food Science and Technology**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 273–281, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1590/fst.32318>
- MÜLLER, M. *et al.* Physical Methods for Dealcoholization of Beverage Matrices and their Impact on Quality Attributes. **ChemBioEng Reviews**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 310–326, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1002/cben.201700010>
- PEREIRA, C C *et al.* Aroma compounds recovery of tropical fruit juice by pervaporation: membrane material selection and process evaluation. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 66, n. 1, p. 77–87, 2005. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.037>
- PEREIRA, Cristina C *et al.* Pervaporative recovery of volatile aroma compounds from fruit juices. **Journal of Membrane Science**, [s. l.], v. 274, n. 1, p. 1–23, 2006. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.10.016>

- PICKERING, G. J. Low- and Reduced-alcohol Wine: A Review. **Journal of Wine Research**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 129–144, 2000. Available at: <https://doi.org/10.1080/09571260020001575>
- PILIPOVIK, M. V; RIVEROL, C. Assessing dealcoholization systems based on reverse osmosis. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 69, n. 4, p. 437–441, 2005. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.035>
- PURWASASMITA, M. *et al.* Beer dealcoholization using non-porous membrane distillation. **Food and Bioproducts Processing**, [s. l.], v. 94, p. 180–186, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.03.001>
- RUIZ-RODRÍGUEZ, A. *et al.* Supercritical CO<sub>2</sub> extraction applied toward the production of a functional beverage from wine. **Journal of Supercritical Fluids**, [s. l.], v. 61, p. 92–100, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2011.09.002>
- RUSSO, P. *et al.* Investigation of osmotic distillation technique for beer dealcoholization. **Chemical Engineering Transactions**, [s. l.], v. 32, p. 1735–1740, 2013. Available at: <https://doi.org/10.3303/CET1332290>
- SAMPRANPIBOON, P. *et al.* Separation of aroma compounds from aqueous solutions by pervaporation using polyoctylmethyl siloxane (POMS) and polydimethyl siloxane (PDMS) membranes. **Journal of Membrane Science**, [s. l.], v. 174, n. 1, p. 55–65, 2000. Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)00365-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)00365-3)
- SANTOS, S. D. P. **Os Primórdios da Cerveja no Brasil**. [S. l.]: Atelie, 2003.
- SCHÄFER, T.; CRESPO, J. G. Aroma Recovery by Organophilic Pervaporation. *In*: BERGER, R. G. (org.). **Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 427–437. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-49339-6\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-540-49339-6_19)
- SHEPHERD, A.; HABERT, A. C.; BORGES, C. P. Hollow fibre modules for orange juice aroma recovery using pervaporation. **Desalination**, [s. l.], v. 148, n. 1, p. 111–114, 2002. Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00662-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00662-8)
- STEWART, G.G., & PRIEST, F. G. **Handbook of Brewing**. 2nd. ed. [S. l.]: CRC Press, 2006.
- WRIGHT, A. J.; PYLE, D. L. An investigation into the use of the spinning cone column for in situ ethanol removal from a yeast broth. **Process Biochemistry**, [s. l.], v. 31, n. 7, p. 651–658, 1996. Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(96\)00017-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0032-9592(96)00017-9)
- ZUFALL, C.; WACKERBAUER, K. Die entalkoholisierung von bier durch dialyse - Verfahrenstechnische beeinflussung der bierqualität. **Monatsschrift fur Brauwissenschaft**, [s. l.], v. 53, n. 9–10, p. 164–179, 2000.