

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

Recuperación y reincorporación de compuestos aromáticos en la cerveza sin alcohol

Autor: Jorge García Pedrote

Tutor: José Fernando Vidal Barrero

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Recuperación y reincorporación de compuestos aromáticos en la cerveza sin alcohol

Autor:
Jorge García Pedrote

Tutor:
José Fernando Vidal Barrero

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Resumen

En el presente trabajo se realiza un estudio cuyo objetivo es desarrollar una cerveza sin alcohol recuperando sabores de la cerveza convencional (cerveza alcohólica) e incorporándolos posteriormente a la cerveza sin alcohol.

En primer lugar, se hará una breve introducción en la que se hablará de la importancia y la influencia del sector cervecero español en la economía y en el consumo.

Posteriormente, analizaremos los pasos para la elaboración de la cerveza, un paso previo para el proceso de desalcoholización que se estudiará. Se compararán los métodos industriales más utilizados para la desalcoholización de la cerveza y se elegirá uno en función de la idoneidad para el proceso.

Finalmente, mediante la literatura mencionada, hemos realizado el diseño de una planta de pervaporación industrial como método de recuperación de los compuestos aromáticos que enriquecen la calidad de la cerveza.

Abstract

In the present work, a study is conducted with the objective of developing a non-alcoholic beer by recovering flavors from conventional beer (alcoholic beer) using pervaporation and subsequently incorporating them into the non-alcoholic beer.

Firstly, a brief introduction will be provided, discussing the importance and influence of the Spanish beer sector on the economy and consumption.

Subsequently, we will analyze the steps for brewing beer, which will serve as a preliminary for the dealcoholizing process to be studied. The most used industrial methods for beer dealcoholization will be compared, and one will be chosen based on its suitability for the process.

Finally, based on the referenced literature, we have designed an industrial pervaporation plant as the method for recovering aromatic compounds that enhance the quality of the beer.

Índice

Resumen	5
Abstract	6
Índice.....	7
Índice de Tablas	9
Índice de Figuras	10
1 Objetivo y Alcance	12
2 Introducción.....	13
2.1 Sector Cervecerero en España,	13
2.1.1 Consumo y ventas en 2022	13
2.1.2 Producción a nivel nacional y aportación a la economía del país	15
3 Elaboración de la cerveza	17
3.1 Proceso de malteado.....	18
3.2 Fabricación del mosto	19
3.2.1 Molturación	19
3.2.2 Maceración.....	19
3.2.3 Filtración del mosto	20
3.2.4 Cocción del mosto	20
3.3 Fermentación y maduración	21
3.3.1 Adición de levaduras	21
3.3.2 Fermentación del mosto	22
3.3.3 Maduración	23
3.4 Filtración y estabilización de la cerveza	23
3.4.1 Filtración	23
3.4.2 Estabilización de la cerveza	24
3.4.3 Envasado y embotellado	25
4 La cerveza sin alcohol	26
4.1 Producción de la cerveza sin alcohol.....	26
4.1.1 Producción de la cerveza sin alcohol mediante métodos de eliminación del etanol	27
4.1.1.1 Procesos térmicos.....	27
4.1.1.1.1 Planta de rectificación de vacío	28
4.1.1.1.2 Evaporadores de película fina	29
4.1.1.2 Procesos de membrana	33
4.1.1.2.1 Diálisis	33
4.1.1.2.2 Ósmosis inversa	34
4.1.2 Producción de la cerveza sin alcohol mediante métodos de restricción del etanol	35
4.1.2.1 Proceso de maceración modificado.....	35
4.1.2.2 Fermentación detenida o limitada.....	36
4.1.2.3 Utilización de levaduras especiales.....	37
4.1.2.4 Fermentación continua	38
4.2 Elección del método de desalcoholización de la cerveza	39

5	Recuperación de compuestos aromáticos mediante pervaporación.....	41
5.1	<i>Etanol y aromas formados durante la fermentación de la cerveza</i>	41
5.2	<i>La pervaporación, un método prometedor</i>	44
5.2.1	Principios de la Pervaporación	44
5.2.2	Tipos de membranas utilizadas en la Pervaporación	46
5.2.3	Aplicaciones de la Pervaporación.....	47
5.2.3.1	Deshidratación de compuestos orgánicos	47
5.2.3.2	Separación de mezclas orgánicas	47
5.2.3.3	Separación de compuestos orgánicos del agua.....	47
5.3	<i>La pervaporación como método de enriquecimiento sensorial de la cerveza sin alcohol</i>	48
5.3.1	Diseño de una planta industrial de recuperación de compuestos aromáticos mediante un sistema de pervaporación	49
5.3.2	Balance de materia.....	52
5.3.3	Balance de energía	54
5.3.4	Selección de los equipos.....	57
6	Conclusión.....	64
7	Bibliografía.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- Caudales Sistema de membranas.....	53
Tabla 2-Concentraciones de los Caudales.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Evolución del consumo aparente de cerveza y por canal(Ministerio de agricultura, 2022)	14
Figura 1.2- Producción de cerveza en España en 2022(Ministerio de agricultura, 2022).....	15
Figura 1.3- Producción de cervceras que elaboran menos de 50000 hectolitros al año (Ministerio de agricultura, 2022)	16
Figura 3.1- Rangos de filtración(Castro, R. (2010)).....	24
Figura 4.1- Esquema de los diferentes métodos de desalcoholización de cerveza(Montanari et al., 2009).....	27
Figura.4.2- Esquema abreviado de un proceso Simatec.....	28
Figura 4.3. Funcionamiento evaporador Centritherm	29
Figura 4.4. esquema del funcionamiento de una columna de conos giratorios (Conetech)	30
Figura 4.5- Evaporador de película descendente.....	32
Figura 4.6 – Proceso de diálisis(Bompart, 2008)	34
Figura 4.7-Funcionamiento ósmosis inversa en la desalcoholización de la cerveza(Lurueña, 2012)	34
Figura 5.1- Compuestos formados durante la fermentación de la cerveza.(Miguel et al., 2010)	42
Figura 5.2- Síntesis de alcoholes superiores a través de la vía catabólica, [NH ₂] representa el grupo transferido a la enzima transaminasa.(Miguel et al., 2010)	43
Figura 5.3- síntesis de ésteres a partir de alcoholes y reacción con acetil-CoA.(Miguel et al., 2010)	44
Figura 5.4- Esquema de los principios de la pervaporación.....	45
Figura 5.5- Esquema de los dos métodos de crear diferencia de presión en el permeado(Belén et al., n.d.)	45
Figura 5.6- Esquema de procesos de pervaporación (a) hidrófila y (b) organófila.(Directores et al., 2017).....	48
Figura 5.7 Diagrama de flujo de un sistema de recuperación de compuestos aromáticos, desalcoholización y reincorporación de compuestos aromáticos de la cerveza.	50
Figura 5.8 Diagrama de flujo del diseño de una planta industrial de pervaporación	52
Figura 5.9-Intercambiador de calor de placas (FM GRUPO TECNOLÓGICO, n.d.).....	57
Figura 5.10 – Intercambiador de calor tubular(RETECNO S.L, 2023)	58
Figura 5.11- Bomba de impulsión del fabricante Polsinelli(Polsinelli, 2023).....	59
Figura5.12- bomba de vacío CRV pro-2	60
Figura 5.13- Condensador de vapor del fabricante Kelvion Germany GmbH.....	61
Figura 5.14-Tanque de almacenamiento (Magusa, 2017).....	62
Figura 5.15- Membranas de POMS del fabricante GMT	62
Figura 5.16- Módulo de membrana(Miguel et al., 2010).....	63

1 OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo del presente trabajo es estudiar un método para recuperar compuestos aromáticos de la cerveza para posteriormente reincorporarlos a la misma, una vez se ha desalcoholizado. La motivación de este estudio es la gran diferencia sensorial entre la cerveza convencional o alcohólica, y la calidad del producto una vez se ha sometido a un proceso de desalcoholización. Existen diferentes métodos de desalcoholización de la cerveza, pero todos ellos presentan el mismo problema en mayor o menor medida, la eliminación de compuestos volátiles o aromáticos. Estos compuestos aromáticos, son los que le aportan ese sabor característico a la cerveza, y con el fin de mitigar la pérdida de concentración de estos compuestos en el producto desalcoholizado, en este trabajo se propone extraerlos previamente a la desalcoholización mediante un método denominado pervaporación. Se realizará el diseño de una planta industrial de desalcoholización de cerveza mediante una columna de conos giratorios, y el diseño y cálculo de balance de materia y energía de una planta industrial de pervaporación. Finalmente se buscará reincorporar estos aromas recuperados a la cerveza sin alcohol.

Por tanto, se hará una revisión de la elaboración de la cerveza y la formación de aromas característicos, los diferentes métodos de desalcoholización y el diseño industrial del proceso de pervaporación, con el fin de encontrar resultados positivos del tema propuesto.

2 INTRODUCCIÓN

La historia de la cerveza se remonta hace más de 6 mil años, en la antigua Mesopotamia, donde la evidencia más antigua es una tablilla en la que se observan varias personas tomando cerveza de un mismo recipiente. Su descubrimiento se considera casi accidental, cuando al mezclar cereales con agua sucedió el milagro. Esta popular bebida pronto fue recibida como herencia en las siguientes civilizaciones, Babilonia, Sumeria o Egipto, donde se sabe que en la época de los faraones se producían hasta 4 millones de litros al año. ¿Pero cuál fue el motivo del auge de la popularidad de esta bebida? La respuesta es sencilla, sus ingredientes, cebada, lúpulo levadura y agua, productos fáciles de encontrar en sociedades eminentemente agrícolas.

Existe una gran variedad de cervezas, sobre las que se establecen numerosas clasificaciones y denominaciones, que dependerán de los ingredientes utilizados, su metodología de elaboración y las características finales de la cerveza. La cerveza se caracteriza por los siguientes parámetros básicos:

- **Contenido alcohólico.** Se expresa en tanto por ciento (%) del volumen total de la cerveza. Los valores habituales oscilan entre los 4,5- 6 % en volumen, aunque hay cervezas que superan incluso el 10%. Por otro lado, por supuesto podemos encontrar cervezas con bajo contenido alcohólico con menos de 1% y otras que incluso llegan a valores cercanos al 0%.
- **Color.** Depende de la malta empleada (su tostado) en su elaboración. Para la valoración de estas se utilizan dos escalas, la EBC (European Brewery Convention) y la SRM (Standard Reference Method). Los valores de dichas escalas son numéricos y se asocian a patrones de color, siendo los valores más bajos las cervezas más claras (rubias) y los más altos a las cervezas tostadas y negras.
- **Amargor.** Esta característica se encuentra estrechamente relacionada con lúpulo añadido en el proceso (cantidad, variedad, riqueza en α - ácidos y β - ácidos) y el manejo de esto durante la etapa de cocción para la obtención del mosto. Este parámetro se valora en IBU (International Bitterness Units), donde el amargor de la cerveza debe encontrarse por encima de 5 IBUs, siendo los valores habituales entre 15 y 40 IBUs.
- **Contenido en CO₂.** Este compuesto es necesario para la formación de la espuma. Su contenido se expresa en % en peso de g de CO₂ por cada 100 g de cerveza. Los valores habituales son entre 0,4 y el 1%.

Así pues, analizaremos la importancia de la cerveza en nuestro país. (Kunze, 2006)

2.1 Sector Cervecerero en España

2.1.1 Consumo y ventas en 2022

El año 2022 ha sido sin duda un año de recuperación para la ciudadanía y diversos sectores tras los impactos de la pandemia, a pesar de la incertidumbre económica y geoestratégica a nivel internacional.

Un sector que también ha experimentado una revitalización es el consumo de cerveza, impulsado por diversos factores. En primer lugar, la permanencia de los hábitos de consumo de cerveza en el hogar, adquiridos durante la pandemia, especialmente cuando se acompaña de otros alimentos. Además, la apertura

sin restricciones de la hostelería ha contribuido a este aumento en el consumo.

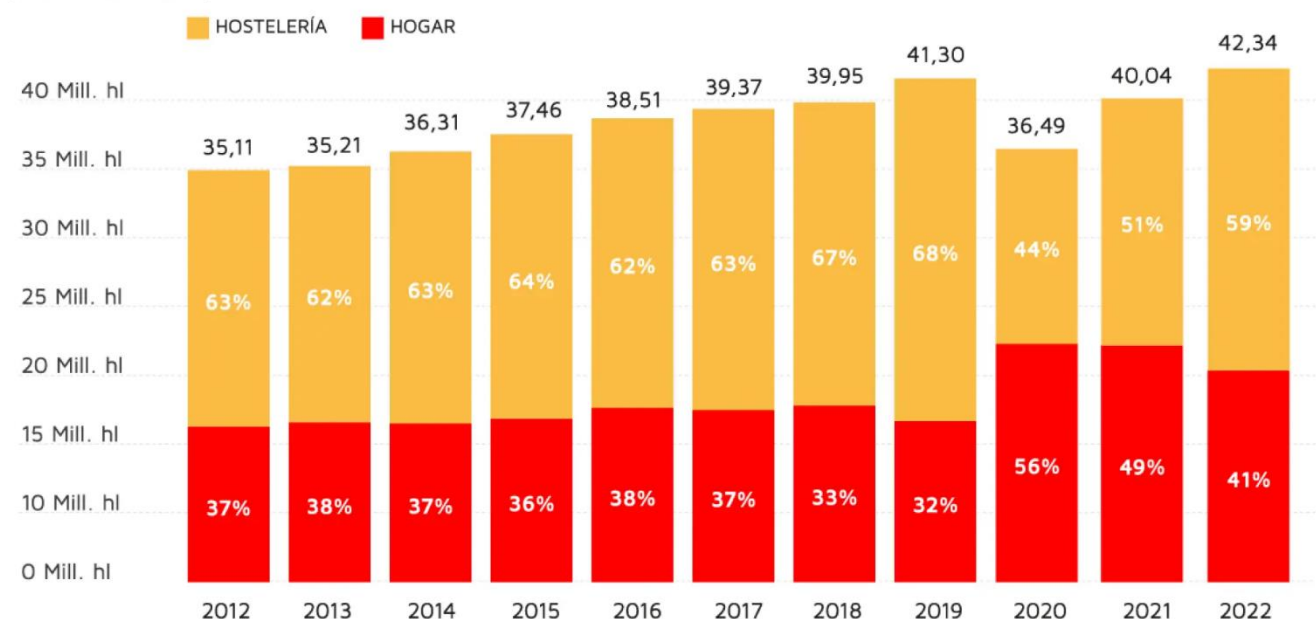
Aunque el consumo de cerveza ha dejado de estar fuertemente asociado a temporadas específicas, las altas temperaturas siguen siendo un factor clave para impulsar la demanda de esta bebida. El consumo per cápita se situó en 58 litros, una cifra moderada pero significativa.

El turismo también ha contribuido al consumo general de cerveza en el país, ya que en 2022 el número de visitantes se duplicó con respecto al año anterior, alcanzando la impresionante cifra de 104,9 millones de turistas y excursionistas frente a los 51,6 millones de 2021.

Debido a todos estos factores, el consumo aparente total de cerveza ascendió a 42,3 millones de hectolitros en 2022, mostrando una clara recuperación y un impulso positivo para la industria cervecera y el sector turístico. (Ministerio de agricultura, 2022)

Evolución del consumo aparente de cerveza y por canal

(Millones de hectolitros)



FUENTE: Cerveceros de España GRÁFICO: Carlos G. Kindelán

20minutos

Figura 1.1- Evolución del consumo aparente de cerveza y por canal(Ministerio de agricultura, 2022)

En cuanto a la comercialización de la cerveza durante el año 2022, se lograron comercializar 38,95 millones de hectolitros de cerveza, lo que evidencia una progresiva recuperación de las ventas.

Esta recuperación ha sido posible gracias a diversos factores. En primer lugar, el turismo ha tenido un papel crucial, ya que el número de visitantes se duplicó significativamente en comparación con el año 2021. En concreto, se recibieron 104,9 millones de turistas y excursionistas en 2022, en contraste con los 51,6 millones del año anterior. El aumento en el turismo tiene un impacto directo en la hostelería, un sector estrechamente vinculado con la venta de cerveza.

Por otro lado, también ha influido en la recuperación el mantenimiento de los hábitos de consumo de cerveza junto con otros alimentos en el hogar, los cuales fueron adquiridos durante la pandemia. Esto ha estimulado la venta de cerveza en el canal de alimentación.

Desde el comienzo de la pandemia, las ventas al canal hostelero han vuelto a superar a las del canal de alimentación, pero la diferencia es apenas de dos puntos porcentuales (51% en hostelería frente al 49% en el hogar). Sin embargo, estas cifras aún no alcanzan los niveles de 2019, donde el canal hostelero representaba el 53,2% de las ventas y el canal hogar el 46,8%.

En el caso específico de la cerveza sin alcohol, se comercializaron 2,91 millones de hectolitros en 2022, lo que representa un aumento del 11% en comparación con 2021. Este incremento está relacionado con un

mayor consumo fuera del hogar, impulsado por la reapertura de establecimientos y la reactivación de la vida social tras la pandemia.

Durante los tres primeros trimestres del año, se han registrado aumentos significativos en comparación con los mismos trimestres del año anterior. En detalle, el primer trimestre experimentó un crecimiento del 9,3%, el segundo trimestre tuvo un impresionante aumento del 18,1%, mientras que el tercer trimestre vio un crecimiento del 3,7%.

Este notable aumento en el segundo trimestre puede explicarse por diversos factores. En primer lugar, la disposición de los festivos primaverales, especialmente coincidiendo con la Semana Santa, ha tenido un impacto positivo en las ventas, ya que es un período vacacional en el que la demanda de cerveza suele incrementarse.

Además, la primavera del año en cuestión fue especialmente calurosa desde el punto de vista climatológico, lo que siempre anima al consumo de cerveza. Las altas temperaturas suelen impulsar la preferencia por esta bebida refrescante, lo que ha contribuido al aumento en el consumo durante ese periodo (Ministerio de agricultura, 2022)

2.1.2 Producción a nivel nacional y aportación a la economía del país

En el año 2022, España ha alcanzado una impresionante producción de 41,1 millones de hectolitros de cerveza, lo que representa un incremento del 7,9% en comparación con el año anterior. Este logro ha posicionado a España como el segundo mayor productor de cerveza dentro de la Unión Europea, quedando únicamente detrás de Alemania.

Por un lado, encontramos un auge en cuanto a producción de los grandes fabricantes de cerveza de nuestro país con unas cifras ajustadas unas con otras

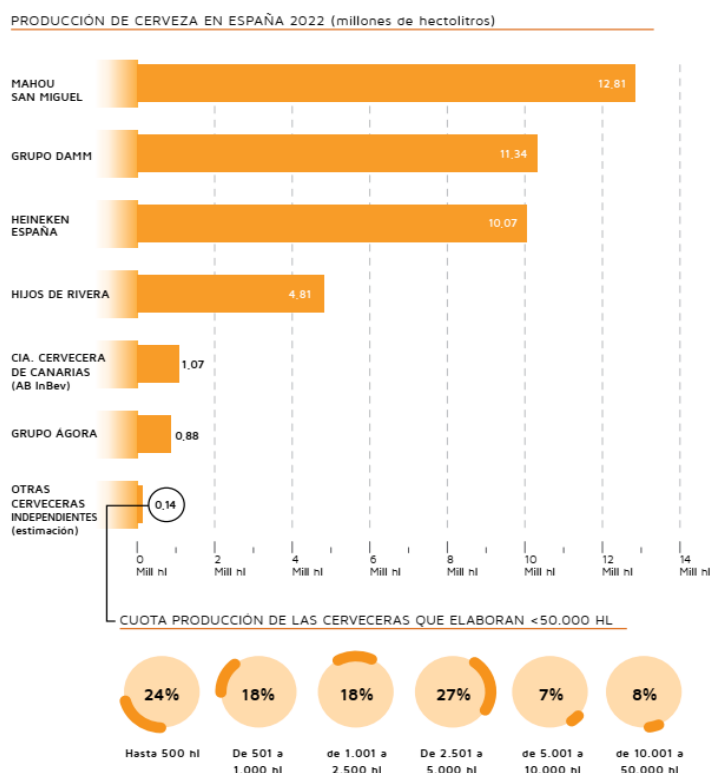


Figura 1.2- Producción de cerveza en España en 2022 (Ministerio de agricultura, 2022)

En la otra cara de la moneda encontramos que el año 2022 no ha sido favorable para las cerveceras con

producciones menores a 50.000 hectolitros, ya que se ha experimentado un descenso del 3% tanto en la producción como en el número de centros operativos. En comparación con el periodo anterior a la pandemia, se ha registrado un notorio declive del 35% en el número de cerveceras y una reducción del 20% en la producción.

Es fundamental para este segmento que el consumo en hostelería se reactive, ya que constituye la principal vía de comercialización y consumo de las cervezas artesanales.

En este mismo segmento, es interesante notar que el 76% de la cerveza elaborada proviene del 20% de las fábricas más grandes. Asimismo, se ha observado un aumento tanto en el número de cerveceras como en la producción en el tramo de 501 a 1.000 hectolitros de producción.

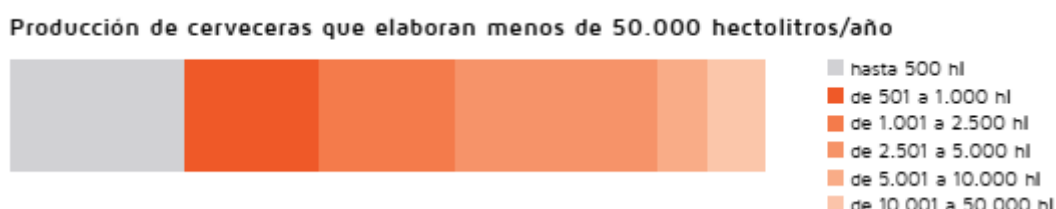


Figura 1.3- Producción de cerveceras que elaboran menos de 50000 hectolitros al año (Ministerio de agricultura, 2022)

En el año 2022, se ratifica la tendencia alcista de las exportaciones de cerveza, mostrando un impresionante incremento del 13,4% en comparación con el ejercicio anterior, lo que llevó a un total de 4,2 millones de hectolitros exportados. Si observamos el rendimiento durante el último trienio, este crecimiento fue aún más destacado, acumulando un impresionante aumento del 36,8% en comparación con el año 2019.

Estos datos corroboran indudablemente la excelencia de las cervezas españolas, consolidando a nuestro sector como un referente sólido más allá de nuestras fronteras.

Si hablamos de la materialización económica de la producción y servicios que el sector cervecero es capaz de generar, es sin duda relevante recalcar su importancia en el impacto que tiene sobre nuestra economía.

La industria cervecera contribuye significativamente a la economía generando 450,000 puestos de trabajo, de los cuales el 87% se encuentran en el sector de hostelería. Es destacable que, una vez más, las empresas cerveceras lideran en el gasto medio de personal, duplicando la media del conjunto de la industria de alimentación, al igual que en el nivel de productividad de su personal.

El valor añadido del sector cervecero en España ha alcanzado los 9,000 millones de euros, mostrando un aumento del 9% con respecto al año anterior. En términos de valor de producción, la cerveza destaca como la principal generadora de ingresos en el sector de bebidas, representando cerca de 4,000 millones de euros, lo que equivale a casi una cuarta parte del total. (Ministerio agricultura y pesca, 2022)

3 ELABORACIÓN DE LA CERVEZA

La cerveza es una bebida que se elabora a través de la fermentación del mosto, que se obtiene de la malta de cebada (u otros cereales), ya sea en solitario o mezclado con otros ingredientes que puedan convertirse en azúcares mediante procesos enzimáticos. Este mosto es sometido a un proceso de cocción y se le añade lúpulo y sus derivados.

Las cuatro materias primas fundamentales para la producción de la cerveza son el agua, la malta de cebada (aunque en ocasiones se pueden utilizar otros cereales como el maíz o el trigo), el lúpulo y la levadura. Cada uno de estos ingredientes desempeña un papel crucial en el proceso de elaboración de la cerveza. (Kunze, 2006)

- El agua es el ingrediente principal de la cerveza. Es el punto de partida en el proceso de elaboración de la cerveza. Constituye hasta el 90% de una cerveza final.
- La cebada agrega color y azúcares fermentables a la cerveza. Se mezcla con agua durante el proceso de maceración y el resultado es un líquido dulce denominado mosto. Estos azúcares aportados son los que posteriormente se transforman en alcohol durante el proceso de fermentación.
- Los lúpulos agregan amargor y aroma. Se añaden al mosto durante el proceso de hervor. Esto se debe a que a esta temperatura liberan aceites aromáticos amargos. Cuanto más duran hirviendo, más amargor agregan, pero pierden más aromas. Es por eso que se hacen adiciones al principio y al final del hervor.
- La levadura es un hongo utilizado para fermentar los azúcares en el mosto. A través de este proceso convierte dichos azúcares en alcohol y CO₂. Si bien este CO₂ no es útil en el proceso de fermentación, es útil si se elija la carbonatación natural. El azúcar se agrega a la cerveza justo antes de ser embotellada y sellada. De esta manera, el CO₂ no se escapa y carbonata la cerveza.

La producción de la cerveza puede diferir de una planta cervecera a otra, como también las características de la cerveza producida o los distintos equipos involucrados en su elaboración. Sin embargo, el proceso de elaboración de cualquier tipo de cerveza se puede desglosar en cinco fases:

- Proceso de malteado
- Fabricación del mosto
- Fermentación y maduración
- Filtración
- Envasado y embotellado

3.1 Proceso de malteado

Sin malta no se puede fabricar cerveza. Es por eso que la fabricación de malta de cebada es el primer paso para la fabricación de la cerveza. Si bien es cierto que pueden utilizarse otros cereales como el trigo el centeno o el arroz, es la malta de cebada la que se impuso históricamente como la más adecuada para la fabricación de la cerveza.(Kunze, 2006)

La malta de cebada es el resultado de un proceso meticuloso de germinación y secado de las semillas de cereales, principalmente cebada. Este proceso, llevado a cabo bajo condiciones específicas de tiempo y temperatura, tiene como objetivo principal desarrollar las enzimas necesarias y realizar cambios en la estructura molecular de la semilla para obtener la mayor cantidad posible de moléculas de azúcares fermentables y nutrientes básicos para la levadura.

Para obtener la malta, se requiere una cantidad significativa de cebada. Aproximadamente 100 kilos de cebada se utilizan para obtener 80 kilos de malta pálida no tostada, que, a su vez, se utiliza para producir alrededor de 400 litros de cerveza. Es un proceso intensivo que requiere cuidado y atención para asegurar la calidad de la malta resultante.

La cebada cervecera utilizada para la producción de malta se cosecha y almacena durante un corto periodo, generalmente entre 6 y 8 semanas. Durante este tiempo de almacenamiento, todas las semillas de cebada entran en un estado parecido al de hibernación, manteniéndose vivas y consumiendo oxígeno. Para garantizar un almacenamiento adecuado, los silos o almacenes deben ser oxigenados correctamente, evitando niveles excesivos de oxígeno que podrían generar problemas en la conservación.

Una vez que la cebada ha sido almacenada adecuadamente, se procede a limpiarla y eliminar cualquier grano o elemento extraño que pueda estar presente. Las semillas de cebada también son seleccionadas y clasificadas en función de su tamaño. Tras unas 8 semanas de almacenamiento, el proceso de malteado se inicia sumergiendo las semillas en agua oxigenada, lo que provoca una absorción de agua que aumenta su contenido hasta un nivel aproximado del 45 por ciento.

La hidrólisis del almidón y las proteínas en azúcares y aminoácidos respectivamente es el resultado del efecto del agua y las enzimas hidrolíticas durante este proceso de sumergimiento. Sin embargo, el objetivo del malteado no es la germinación completa para crear una planta, sino la conversión del almidón y las proteínas en subproductos que sean útiles durante el proceso de elaboración de la cerveza. Para detener la germinación, se elimina el agua de las semillas reduciendo su contenido alrededor del 3 por ciento, utilizando aire a altas temperaturas. Es importante no destruir las enzimas, por lo que se aplica aire caliente una vez que las semillas se han secado en su mayoría.

El tipo de malta obtenida dependerá de la temperatura y el tiempo de secado. Si se inicia el secado a 60 grados durante 30 minutos, las enzimas convertirán los almidones en azúcar, mientras que temperaturas superiores a 80 grados evitarán este proceso y la consecuente caramelización. La malta tipo pilsener es la más común y se seca a temperaturas entre 70 y 90 grados centígrados, ideal para cervezas claras como pilsen y lager.

Otros tipos de malta, como la malta tipo Viena y Munich, se secan a temperaturas más altas, lo que produce diferentes niveles enzimáticos y mayor cantidad de melanoidinas que dan color y sabor a las cervezas resultantes. Las maltas especiales, caramelizadas o tostadas bajo condiciones extremas, se añaden en pequeñas cantidades para impartir sabores específicos a las cervezas.(De Mesones, 2009)

3.2 Fabricación del mosto

3.2.1 Molturación

A los efectos de posibilitar a las enzimas de la malta que actúen sobre los componentes de esta última y que los descompongan durante la maceración, la malta debe ser triturada. Este proceso se llama molturación. La cantidad de carga de materias primas utilizada para un cocimiento se denomina carga.

La molturación es un proceso de trituración mecánica, en el que, sin embargo, las cáscaras deben ser tratadas cuidadosamente, dado que se las necesita como material filtrante en la filtración del mosto.

Para la trituración debe tenerse en cuenta una serie de consideraciones. Pero antes de molturar la malta, la cantidad de carga utilizada es pesada en una balanza.

La malta es triturada en el molino triturador de malta. Según el tipo de proceso se diferencia entre:

- Molinos trituradores de malta en seco
- Molinos trituradores de malta húmeda
- Molinos de martinete

3.2.2 Maceración

La maceración es una etapa fundamental en el proceso de elaboración de cerveza. Consiste en mezclar la malta molturada con agua a una temperatura específica para disolver los almidones y otros componentes solubles presentes en la malta. Esta mezcla de componentes disueltos en el agua se denomina extracto, y se busca obtener la mayor cantidad posible de extracto de la malta en el agua durante la maceración.

Existen diferentes variedades de maceración, cada una con diferentes tiempos y temperaturas asignados, lo que permite obtener diferentes estilos de cerveza con características únicas. Durante la maceración, ocurren tres efectos importantes en los gránulos de malta molturada.

En primer lugar, se produce el engrudamiento de la maceración, donde el almidón almacenado en pequeñas celdillas de los granos se hincha y se libera al agua, aumentando la viscosidad de la mezcla. La temperatura requerida para el engrudamiento varía según el tipo de cereal, siendo alrededor de 60 grados centígrados para la cebada y malta de cebada, y entre 80 y 85 grados centígrados para el arroz.

En segundo lugar, se lleva a cabo la licuación de la maceración, donde las enzimas alfa amilasa actúan sobre los almidones liberados, reduciendo su tamaño y disminuyendo la viscosidad de la mezcla.

En tercer lugar, se produce la sacarificación, donde las enzimas beta amilasa rompen las cadenas más cortas de moléculas de dextrinas en grupos de dos, como la maltosa. La temperatura ideal para la acción de las alfa amilasas es entre 72 y 75 grados centígrados, mientras que para las beta-amilasas es entre 60 y 65 grados centígrados.

Una vez que la sacarificación es completa, se obtienen diferentes tipos de azúcares, como glucosa, maltosa, maltotriosa y dextrinas. La glucosa es fermentada en primer lugar por la levadura, seguida de la maltosa y, finalmente, la maltotriosa.

La maceración también implica la degradación de proteínas, que contribuyen al cuerpo y la estabilidad de la espuma en la cerveza final. El control de la degradación de proteínas se realiza mediante la manipulación de la temperatura durante la maceración. También se degradan los betaglucanos, que son como gomas y pueden dificultar la filtración de la maceración.(De Mesones, 2009)

3.2.3 Filtración del mosto

Al final del proceso de maceración la templa está compuesta por una mezcla acuosa de sustancias disueltas y no disueltas.

La solución acuosa de los extractos se llama mosto, las partes no disueltas se denominan heces. Las heces están compuestas esencialmente por las cáscaras, los embriones y otras sustancias que no entraron en solución durante la maceración o que han sido precipitadas nuevamente durante la cocción del mosto.

Para la fabricación de cerveza se utiliza solamente el mosto, el cual debe ser separado para ese propósito de las heces, en lo posible totalmente. Este proceso de separación se llama filtración del mosto. En la filtración del mosto, el extracto debe ser recuperado, en lo posible de forma total. La filtración del mosto es un proceso de filtración, en el que las heces cumplen el papel de material filtrante. (Kunze, 2006)

El proceso ocurre en dos fases, que se suceden de forma separada, una tras otra:

- La descarga del primer mosto (colada principal)
- El lavado de las heces para la extracción del extracto soluble (coladas secundarias)

3.2.4 Cocción del mosto

El principal objetivo de esta fase es la adición del lúpulo, que va a aportar sabores, amargor y aromas al resultado final. Además, durante esta fase, el mosto volatiliza sustancias e impurezas que pueden afectar negativamente al resultado final. Se comienza a hervir el mosto. Al llegar a temperatura de ebullición comienza a crearse una capa de espuma. Ha de observarse que no rebose la espuma por encima de nuestro recipiente o afectaría a los quemadores. Dicha espuma es recomendable retirarla, ya que en ella se acumulan proteínas que pueden dificultar el trabajo de la levadura posterior.

En el momento que retiremos la capa espumosa se añadirá el lúpulo de amargor. El tiempo de cocción llevará una hora desde el punto de ebullición, y en el momento que queden 5 minutos para terminar el proceso es cuando se añade el lúpulo de aroma. De otra forma las esencias podrían degradarse pudiendo llegar a obtenerse un resultado desagradable. Una vez terminado el proceso se vuelve a medir la densidad de la mezcla.

La cantidad de lúpulo a utilizar depende del tipo de cerveza a obtener, cantidad, y del amargor y aromas que queramos degustar al final. También hay que tener la cuenta que, por evaporación, parte del mosto se va a perder. Debemos considerar esas pérdidas para no llevarnos sorpresas al final del proceso.

3.3 Fermentación y maduración

3.3.1 Adición de levaduras

La etapa de adición de levadura es crucial en el proceso de elaboración de la cerveza, ya que es en este momento cuando se inicia el proceso de fermentación, en el cual la levadura transformará los azúcares presentes en el mosto en alcohol y dióxido de carbono. Para garantizar un arranque óptimo de la fermentación y obtener una cerveza de alta calidad, es necesario prestar atención a varios factores clave.

Antes de agregar la levadura al mosto, es esencial asegurarse de que este se encuentre a la temperatura ideal para el tipo de levadura que se va a utilizar y que esté suficientemente oxigenado. La temperatura adecuada es crucial, ya que determinará la actividad metabólica y el comportamiento de la levadura durante la fermentación. Además, un adecuado nivel de oxígeno disuelto en el mosto favorecerá la multiplicación de la levadura antes de que comience a consumir los azúcares.

En ocasiones, la levadura que se va a utilizar proviene de fermentaciones anteriores y puede estar mezclada con CO₂, el cual es producido por ella misma. Esta acumulación de CO₂ dificultará el comienzo rápido y deseado de la fermentación. Por tanto, es altamente recomendable multiplicar la levadura previamente a través del oxígeno disuelto, con el fin de obtener células jóvenes y vigorosas.

Al agregar la levadura al mosto, no se iniciará la fermentación de inmediato. La levadura necesitará un período de adaptación al nuevo entorno antes de comenzar a metabolizar los azúcares. Es importante tener en cuenta esta fase de adaptación y permitir que la levadura se aclimate antes de que se ponga en marcha la fermentación completa.

Cuando se ha garantizado un adecuado nivel de oxígeno disuelto en el mosto y la levadura ha tenido tiempo para adaptarse, es momento de establecer la temperatura ideal de fermentación. Aunque la fermentación se realizará, por ejemplo, a 8 grados centígrados, es recomendable tener el mosto a unos grados por encima de esta temperatura al principio, para que la levadura multiplique de manera óptima. Una vez que el oxígeno disuelto ha sido consumido y la levadura comienza a metabolizar los azúcares, se puede ajustar la temperatura a la ideal para la fermentación completa.

La manera adecuada de añadir la levadura es mezclándola de manera homogénea con el mosto. Lo ideal es realizar esta adición mientras un difusor inyecta aire en el mosto. De esta forma, las turbulencias generadas por la corriente de aire mezclan y disuelven el oxígeno en el mosto y favorecen el contacto casi directo con la levadura, permitiendo también eliminar el posible CO₂ aún presente en ella.

El recuento de células de levadura es una práctica empleada en algunas fábricas de cerveza industriales. Se realiza para conocer con precisión la cantidad de levadura que se añadirá al tanque de fermentación. El objetivo es obtener una cantidad óptima de levadura, alrededor de 50 millones de células por mililitro, de acuerdo con el tipo de levadura y el tipo de cerveza que se desee producir. (De Mesones, 2009)

3.3.2 Fermentación del mosto

Para lograr una fermentación exitosa, es esencial controlar cuidadosamente las temperaturas de fermentación y ajustarlas según el metabolismo de la levadura utilizada. La levadura es responsable de convertir los azúcares presentes en el mosto en alcohol y CO₂. Sin embargo, durante este proceso, también se producen alcoholes superiores y otros subproductos que influirán en las características de la cerveza.

La temperatura de fermentación es uno de los factores clave que determinan la velocidad y el perfil de fermentación. Las cepas de levadura de fermentación de superficie trabajan mejor a temperaturas ideales entre 20 y 24 grados centígrados, produciendo ésteres y subproductos que mejoran la calidad de la cerveza. En contraste, las cepas de levadura de fermentación de fondo requieren temperaturas más bajas, entre un grado y diez grados centígrados, para obtener resultados deseados.

La presión en los tanques de fermentación también influye en el proceso. Tanques cerrados pueden frenar la fermentación debido a la acumulación de CO₂, mientras que los tanques abiertos liberan este gas. El control de la cantidad de levadura añadida al mosto es esencial para mantener una calidad constante en la cerveza. La concentración de células de levadura suele variar entre 20 y 100 millones por milímetro cuadrado.

La presencia de oxígeno disuelto en el mosto es crucial para permitir la multiplicación de las células de levadura antes de que comiencen a fermentar los azúcares. El cinc es otro elemento esencial para el proceso de fermentación, ya que las células de levadura necesitan cinc para su multiplicación. El cobre también es necesario, pero en cantidades muy pequeñas.

El pH ideal del mosto debe situarse entre 5,1 y 5,5 para favorecer la multiplicación de la levadura en condiciones óptimas. Durante la fermentación, el pH disminuirá, y al final, estará entre 4,1 y 4,5. La geometría de los tanques de fermentación también influye en la eficiencia del proceso, ya que las corrientes producidas en el mosto mezclarán el líquido y mantendrán las células de levadura en suspensión.

El control de la formación y descomposición de subproductos durante la fermentación es esencial para obtener una cerveza de alta calidad. Estos subproductos pueden afectar la estabilidad biológica, el sabor, el aroma y la estabilidad de la espuma de la cerveza. Algunos subproductos son beneficiosos en ciertas concentraciones, pero en exceso pueden ser indeseables. Entre los subproductos más comunes se encuentran los alcoholes superiores, los ésteres, el diacetilo, el acetaldehído y los componentes sulfurosos.

Es importante evitar la producción de alcoholes superiores, lo cual puede lograrse iniciando la fermentación a temperaturas más bajas y utilizando una mayor cantidad de levadura para empezar el proceso. El diacetilo, que imparte un sabor a mantequilla, debe eliminarse al final de la fermentación mediante un aumento de temperatura y corrientes en el mosto. El acetaldehído se transformará en etanol durante el almacenaje de la cerveza.

El subproducto más indeseable es el dimetilo de sulfuro (DMS), que puede dar a la cerveza un sabor a verduras cocidas. Es crucial evitar su formación secando y tostando la malta adecuadamente durante el malteado. Además, asegurar un mosto de alta calidad con todos los nutrientes necesarios para la levadura es esencial para una fermentación exitosa. (De Mesones, 2009)

Resumiendo, la fermentación alcohólica se expresa, según la fórmula de Gay-Lussac:



3.3.3 Maduración

Después de la fermentación en los tanques, la cerveza se trasiega a otros recipientes para eliminar la levadura y los restos de fermentación en el fondo. Una vez que ha fermentado el mosto en los tanques de fermentación, pasa a llamarse cerveza verde. Durante el almacenaje, la cerveza continúa madurando y las reacciones químicas entre los componentes orgánicos se mezclan, creando un perfil aromático uniforme.

Los tanques de almacenaje están bajo presión para que el CO₂ producido se disuelva en la cerveza y no se pierda en el aire. Una temperatura baja es esencial para continuar la coagulación y precipitación de proteínas y levaduras, facilitando su eliminación.

Este proceso de almacenaje, también conocido como "Lager" en alemán, se realiza a bajas temperaturas para que la maduración se realice en condiciones óptimas sin acelerar las reacciones químicas. La duración del almacenaje varía según el estilo de cerveza, desde tres semanas hasta varios años para cervezas con mayor contenido de alcohol.

Después de trasegar la cerveza verde a los tanques de almacenaje, se elimina la mayor parte de la levadura, pero la que permanece en suspensión continúa fermentando los azúcares restantes. Esto se debe a que algunos azúcares son más difíciles de fermentar y solo atraen la atención de la levadura una vez que se han consumido los más sencillos.

Hoy en día, muchas fábricas de cerveza utilizan tanques cilindro-cónicos presurizados para realizar la fermentación y el almacenaje sin necesidad de trasegar la cerveza. Una vez concluida la fermentación, se elimina la levadura y otras partículas, y comienza el período de almacenaje en el mismo tanque, regulando la salida de CO₂ excedente según el proceso de fermentación o maduración de la cerveza verde.

3.4 Filtración y estabilización de la cerveza

3.4.1 Filtración

Al finalizar el proceso de maduración, la cerveza está libre de oxígeno, pero aún quedan contenidas por cada ml hasta 1 millón de células de levadura y otras partículas de turbidez como sólidos en suspensión, los cuales deben ser extraídos sin que tenga acceso a la cerveza el oxígeno deteriorante.

La filtración es un proceso de separación, en el cual se extraen las células de levadura y otras sustancias de turbidez aún contenidas en la cerveza. En este proceso también se separan aquellas sustancias, que de lo contrario precipitarían por sí solas en el curso de las próximas semanas y meses y causarían turbidez en la cerveza.

El objetivo de la filtración es hacer que la cerveza sea conservable de manera tal que por un tiempo prolongado no se produzcan cambios visibles.

La filtración ocurre de manera tal que la cerveza aún turbia (líquido no filtrado) es separada por un medio filtrado clarificado y un residuo de filtración o torta filtrante, que queda retenido.

Hay cinco tipos de filtración, en orden de menor a mayor efectividad: la filtración convencional, la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la osmosis inversa.

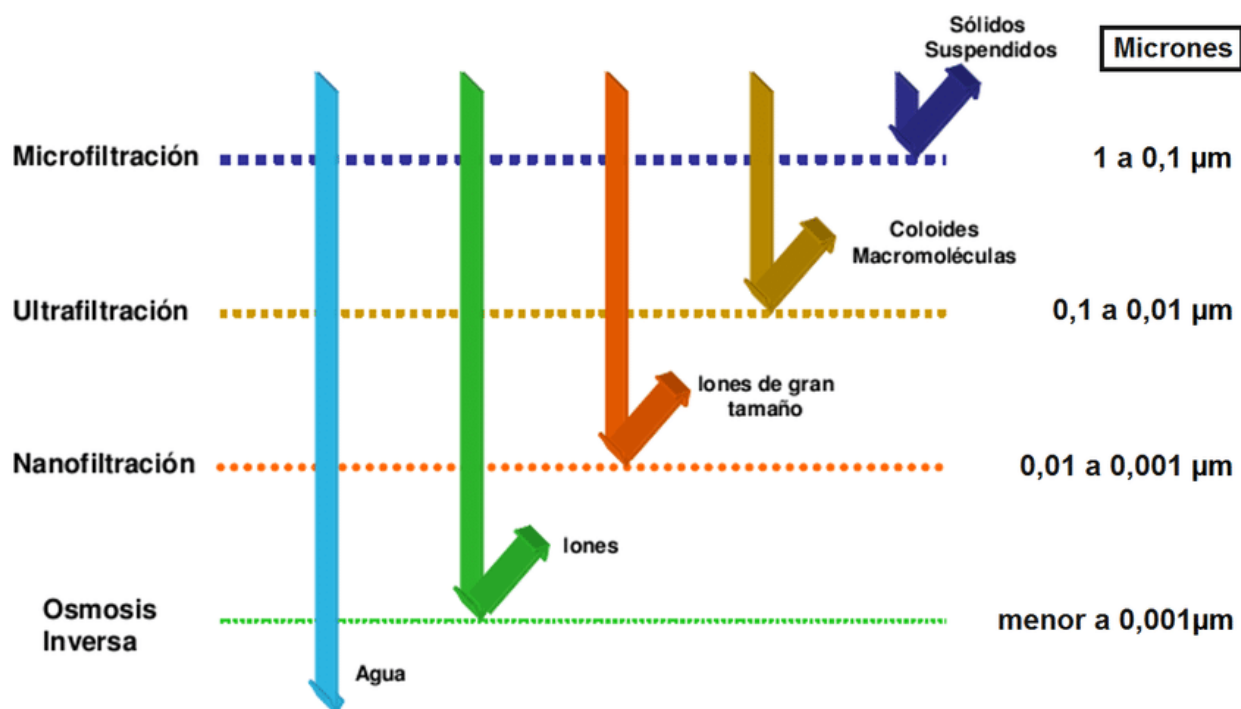


Figura 3.1- Rangos de filtración(Castro, R. (2010))

- La filtración convencional elimina la mayoría de las levaduras, la mitad de las bacterias y ninguna de las partículas coloidales.
- La microfiltración elimina todas las levaduras, todas las bacterias y la mitad de las partículas coloidales.
- La ultra y nano filtración eliminan más cantidad de partículas coloidales, pero nunca su totalidad.
- La osmosis elimina absolutamente todas las partículas.(De Mesones, 2009)

3.4.2 Estabilización de la cerveza

A la hora de comercializar la cerveza lejos del centro de producción, la estabilización de la cerveza cumple un papel decisivo para alcanzar la fecha mínima de conservación indicada dado que la cerveza puede estropearse y ser imbebible en poco tiempo. Existen para ello varias causas fundamentales:

- Los microorganismos, considerados contaminantes, aun presentes en la cerveza pueden propagarse, enturbian la cerveza, empeorando sensiblemente su calidad, debido a la excreción de productos metabólicos.
- Los coloides contenidos en la cerveza se agrandan con el tiempo debido a diferentes factores y enturbian la cerveza.
- Con el tiempo, el sabor de la cerveza experimenta un deterioro

La brillantez de la cerveza es junto con el sabor y la espuma, un factor decisivo de valoración, que también cualquier consumidor puede verificar fácilmente sin ayuda alguna dentro del límite de la fecha mínima de conservación. La turbidez visible de una cerveza puede ser considerado como un defecto cualitativo grave. Este puede causar un daño de imagen y la pérdida del cliente. Por ello es necesario garantizar la estabilidad dentro del tiempo mínimo de conservación. Para ello se dispone de:

- La estabilización biológica de la cerveza
- La estabilización coloidal de la cerveza

3.4.3 Envasado y embarrilado

La distribución y envasado de cervezas representan diferentes opciones para los empresarios, con márgenes de beneficio variables. El embarrilado resulta más asequible para micro fábricas debido a los menores costos de instalación y limpieza en comparación con el embotellado. Vender directamente al público a precios minoristas ofrece el mayor margen de beneficio.

El embarrilado y embotellado se realizan una vez que la cerveza alcanza la maduración deseada en los tanques de almacenaje o maduración. Al rellenar barriles o botellas, es crucial considerar la temperatura de estos y de las líneas de circulación de la cerveza, ya que la cerveza a baja temperatura mantiene más CO₂ disuelto.

El control de la presión durante el llenado es esencial para evitar la formación de espuma no deseada.

Tanto los barriles como las botellas se llenan con CO₂ a presión justo antes de recibir la cerveza para mantener la presión y eliminar el aire y el oxígeno que pueden oxidar la cerveza con el tiempo. Las pequeñas microcerveceras, que no utilizan maquinaria especializada para mantener la presión durante el llenado, provocan una tercera fermentación dentro de los recipientes añadiendo una pequeña cantidad de mosto sin fermentar y levadura en el momento del rellenado.

Es esencial garantizar que el mosto o azúcar añadido esté en condiciones bacteriológicas óptimas para evitar infecciones en los barriles o botellas. Los recipientes se mantienen a temperaturas de fermentación durante unos diez días, controlando el aumento de presión producido por la conversión de azúcares en CO₂. Una vez alcanzada la presión deseada y la fermentación total de los azúcares, las botellas y barriles se enfrían y se preparan para su venta. (De Mesones, 2009)

4 LA CERVEZA SIN ALCOHOL

La cerveza sin alcohol ha existido desde hace siglos, aunque su popularidad ha aumentado significativamente en las últimas décadas. Se cree que los egipcios y los griegos producían cerveza sin alcohol al dejar que el mosto de cebada fermentara naturalmente durante un corto periodo de tiempo. Sin embargo, no fue hasta principios del siglo XX que la cerveza sin alcohol se convirtió en un producto comercializado.

La cerveza sin alcohol se produce mediante el mismo proceso que la cerveza tradicional, pero con una menor cantidad de maltas y con un proceso de fermentación más corto para limitar la producción de alcohol. Aunque la cantidad de alcohol puede variar según la marca, la mayoría de las cervezas sin alcohol contienen menos del 0,5% de alcohol por volumen. En cuanto a los tipos de cerveza sin alcohol según su graduación alcohólica, podemos distinguir entre las cervezas sin alcohol y las cervezas con bajo contenido de alcohol. Las cervezas sin alcohol contienen menos del 0,5% de alcohol, mientras que las cervezas con bajo contenido de alcohol pueden contener entre el 0,5% y el 1,2% de alcohol.

Dentro de las cervezas sin alcohol, podemos encontrar una amplia variedad de estilos, desde lagers hasta ales y cervezas de trigo. Algunas cervezas sin alcohol también se elaboran con ingredientes adicionales, como frutas o especias, para añadir un sabor único.

En cuanto a las características de la cerveza sin alcohol, su sabor y aroma varían según la marca y el estilo. Algunas cervezas sin alcohol tienen un sabor y aroma muy similares a la cerveza tradicional, mientras que otras pueden tener un sabor más ligero o un poco dulce debido a la menor cantidad de maltas utilizadas, o también puede deberse a que no se transforme toda la malta durante el macerado, para tener menos fermentación. Algunas cervezas sin alcohol también pueden tener un regusto amargo debido a la presencia de lúpulo.

4.1 Producción de la cerveza sin alcohol

Las estrategias para producir cervezas sin alcohol se pueden dividir en dos grupos principales (procesos físicos y biológicos), que se pueden subdividir aún más como se muestra en la figura (4.1). Los llamados métodos físicos se basan en la eliminación cuidadosa del alcohol de la cerveza y requieren una importante inversión en equipos especiales para la eliminación del alcohol. Después de que el proceso de eliminación ha sido optimizado, la calidad de la cerveza sin alcohol producida suele ser buena. Otra ventaja adicional es que pueden reducir los niveles de etanol en las cervezas a niveles casi indetectables.

Los enfoques de los procesos biológicos más extendidos se basan en la limitación de la formación de etanol durante la fermentación de la cerveza. Por lo general, se llevan a cabo en equipos de cervecería tradicionales y, por lo tanto, no requieren inversiones adicionales, pero sus productos a menudo se caracterizan por tener sabores desagradables. Las mejoras que aportan las levaduras especiales aumentan los costos debido a la compra, selección o construcción de los organismos de producción, así como por la necesidad de separar su propagación. Sin embargo, microorganismos adecuadamente adaptados o seleccionados pueden contribuir significativamente a mejorar la calidad sensorial del producto.

También existen procesos de producción de cerveza sin alcohol (fermentación continua con levadura inmovilizada) basados en una formación limitada de alcohol, que requieren equipos y materiales especiales (biorreactor de operación continua, soporte para la inmovilización celular). En este caso, los mayores costos de inversión deben justificarse con la mayor productividad de los procesos continuos. En general, la formación de etanol, intrínseca a los métodos biológicos, hace imposible la producción de cerveza con contenido alcohólico cercano a cero. (Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida E Silva, 2012)

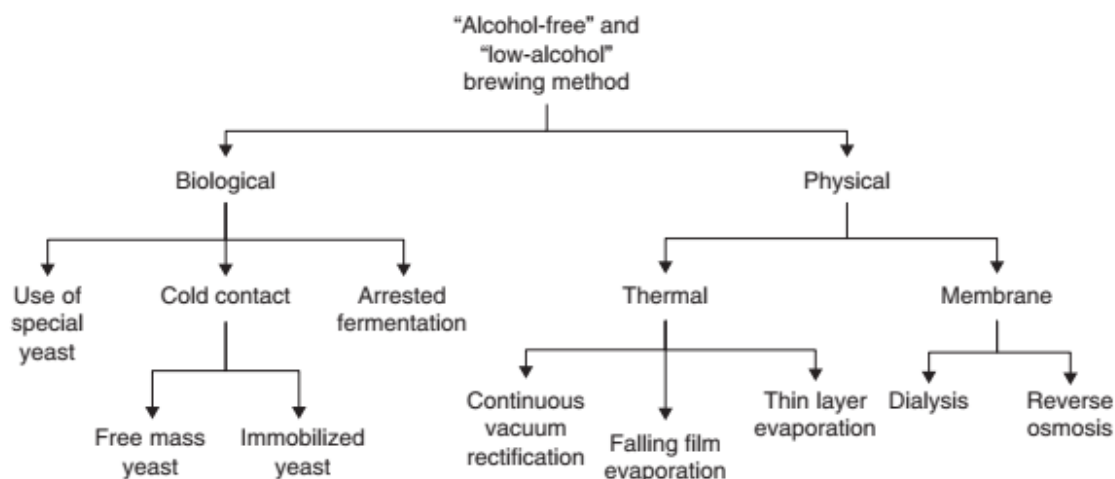


Figura 4.1- Esquema de los diferentes métodos de desalcoholización de cerveza(Montanari et al., 2009)

4.1.1 Producción de la cerveza sin alcohol mediante métodos de eliminación del etanol

Las tecnologías aplicadas para la eliminación completa o parcial del etanol de las cervezas se pueden clasificar en dos grupos basados en el principio del proceso de separación: los procesos térmicos y los procesos de membrana. Además de los métodos aplicados industrialmente para la desalcoholización de la cerveza (rectificación al vacío y evaporación, diálisis y ósmosis inversa), se han estudiado otros métodos en condiciones de laboratorio, como la extracción con membranas, la extracción con CO₂ supercrítico, la pervaporación, la adsorción en zeolitas hidrófobas y la concentración por congelación.(Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida e Silva, 2012)

4.1.1.1 Procesos térmicos

Los primeros intentos de desalcoholizar la cerveza mediante evaporación o destilación a presión atmosférica, que mostraron un daño significativo a la calidad del sabor de la cerveza, fueron pronto reemplazados por la destilación al vacío. Si la presión se reduce, el alcohol puede extraerse a una temperatura mucho más baja. Todos los procesos térmicos para producir cervezas sin alcohol se llevan a cabo a una presión absoluta de 4-20 kPa, lo que permite alcanzar temperaturas de evaporación de 30-60 °C. Aun así, durante los procesos térmicos puede ocurrir una gran pérdida de sabor y vitalidad de la cerveza. El deterioro de la calidad de la cerveza durante la desalcoholización térmica depende principalmente de la temperatura de evaporación y el tiempo de exposición, que depende de la construcción del separador térmico. La producción de cervezas sin alcohol a escala industrial se ha implementado utilizando plantas de destilación al vacío (rectificación) o evaporadores al vacío (de una o múltiples etapas) de dos variantes principales de construcción, evaporadores centrífugos y de película descendente.

En general, las ventajas de los procesos térmicos son: la posibilidad de eliminar completamente el alcohol de la cerveza, la capacidad de comercializar el alcohol separado, la operación continua y automática con un corto período de puesta en marcha, y la flexibilidad en términos de rendimiento volumétrico y composición de la cerveza de entrada. Por otro lado, la adquisición de estos sistemas requiere una inversión significativa, así como costos de funcionamiento considerables (consumo de energía) y algunos riesgos de daño térmico o pérdida de componentes volátiles de la cerveza. Al final de todos los procesos térmicos, la cerveza concentrada sin alcohol debe diluirse con agua libre de oxígeno y carbonatarse.(Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida e Silva, 2012)

4.1.1.1.1 Planta de rectificación de vacío

En un proceso térmico moderno para la suave eliminación del alcohol en la cerveza, se utiliza el proceso SIGMATEC. Primero, la cerveza es desgasificada y luego precalentada en un intercambiador de calor de placas. A continuación, la cerveza se alimenta a la sección de destilación de una columna rectificadora. El líquido fluye hacia abajo en la columna a una temperatura entre 43°C y 48°C. En contracorriente, el producto entra en contacto con los vapores ascendentes, lo que provoca la separación selectiva del alcohol del producto. La cerveza sin alcohol resultante se dirige a un evaporador desde la parte inferior de la columna.

En el evaporador, se producen los vapores necesarios para el proceso de rectificación, que luego se redirigen de vuelta a la columna. Finalmente, el producto completamente desalcoholizado se bombea fuera de la planta después de pasar por un enfriador. Los vapores ricos en alcohol se desplazan desde la sección de destilación hasta la sección de rectificación, donde son concentrados. Además, se lleva a cabo una recuperación de los componentes del aroma en una unidad especial y se redirigen hacia la cerveza. Gracias a este proceso de desalcoholización, el nivel de alcohol se puede reducir a menos del 0.1%.

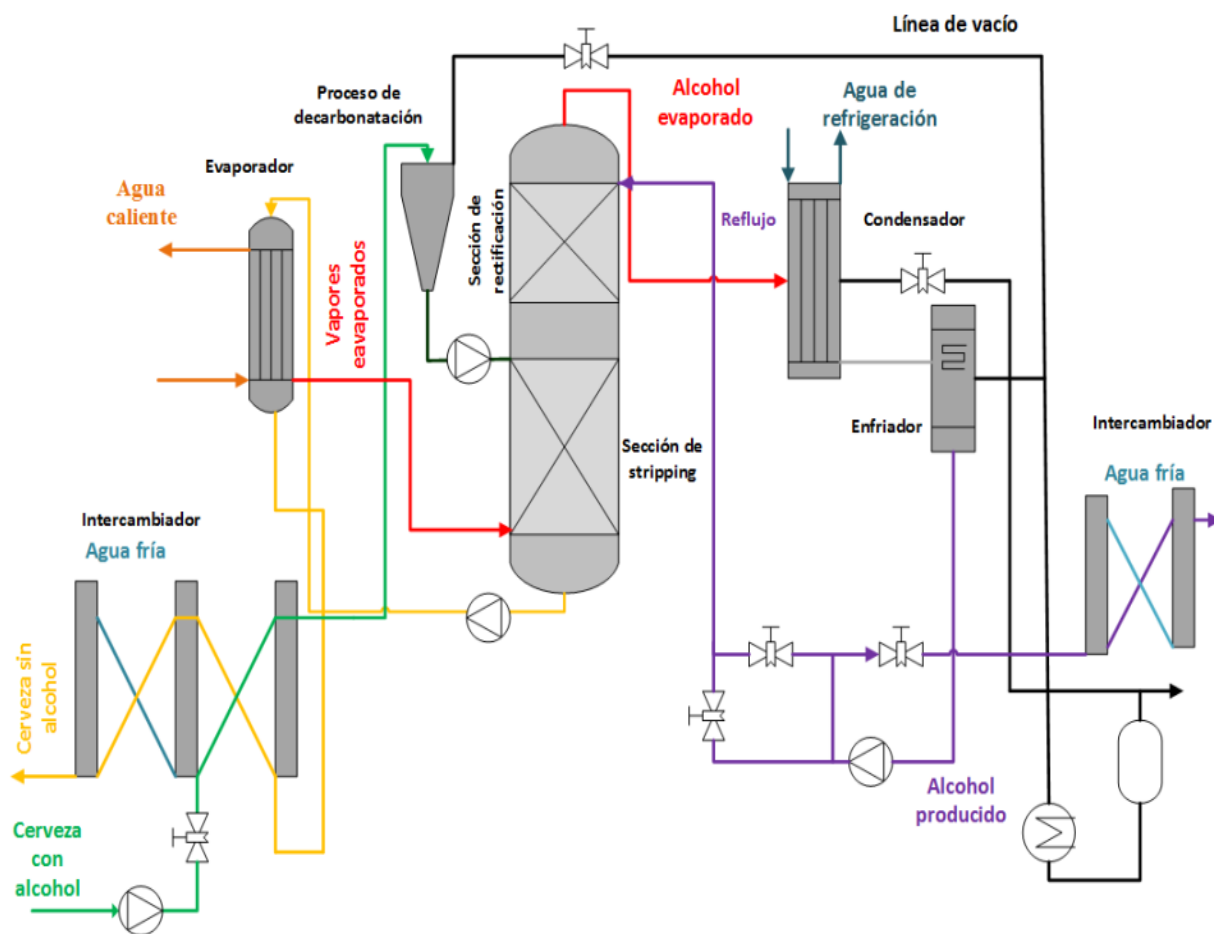


Figura.4.2- Esquema abreviado de un proceso Sigmatec

En ciertos ensayos realizados en una planta industrial de evaporación al vacío equipada con una columna de rectificación, se lograron concentraciones muy bajas de alcohol, y los niveles de la mayoría de los compuestos del aroma en la cerveza desalcoholizada estaban por debajo de los límites de detección. La temperatura del proceso apenas afectó los niveles de reducción.

La calidad de la separación depende del equilibrio entre las fases vapor y líquido, así como del tiempo que la cerveza está en contacto con la superficie de intercambio de calor, que se minimiza cuando la capa líquida es más delgada. Para este tipo de proceso, se utilizan principalmente evaporadores de capa delgada con superficies operadas de forma gravimétrica (evaporador de película descendente) o mecánica (evaporador de rotación al vacío). (Montanari et al., 2009)

4.1.1.1.2 Evaporadores de película fina

Con el fin de agilizar la eliminación de etanol, la cerveza alcohólica fluye a través de estos dispositivos de vacío como una película delgada con una gran área de superficie con un tiempo de residencia extremadamente corto, lo que resulta en una mejora en la calidad del producto. Ejemplos de evaporadores de película delgada, que producen una película líquida delgada de manera mecánica (mediante movimiento de rotación), son los sistemas Centritherm y columna de cono giratorio (SCC) (suministrados por Flavourtech,). Por el contrario, el evaporador de película descendente no contiene piezas móviles y la película líquida se crea mediante el movimiento hacia abajo inducido por la gravedad de la cerveza en la superficie interna de los tubos de calentamiento.

La estructura del sistema Centritherm se asemeja a la de una placa centrífuga (Fig.4.3).

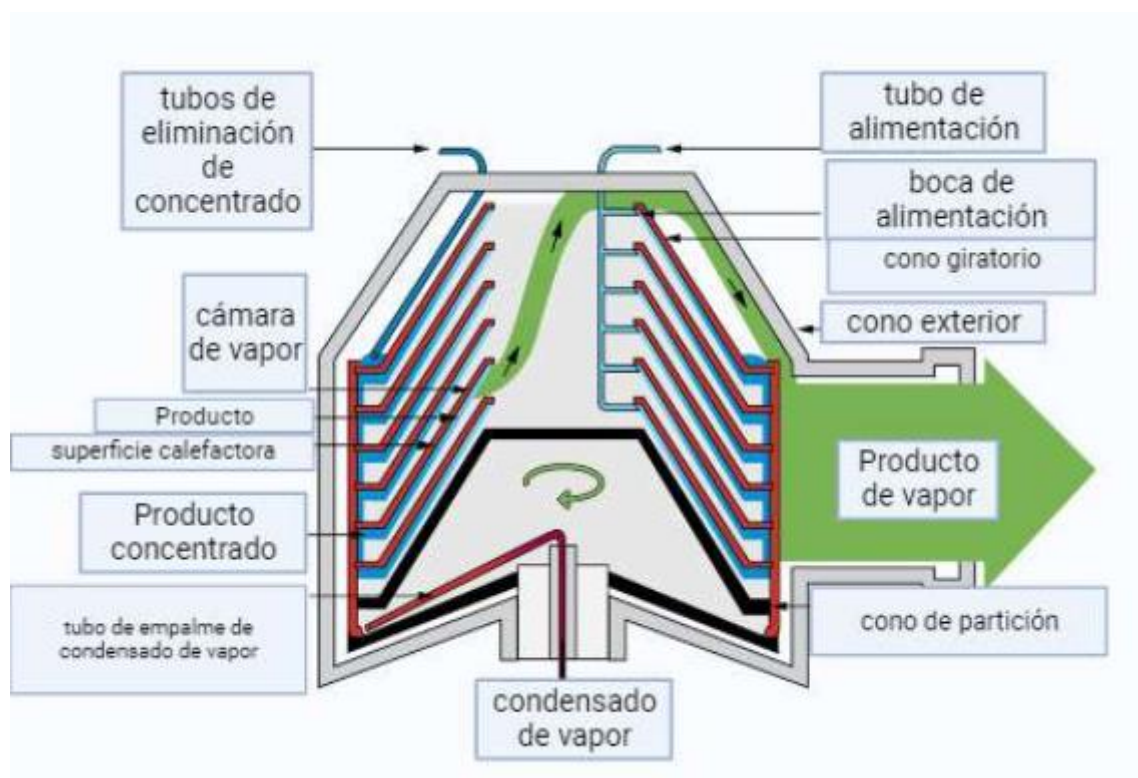


Figura 4.3. Funcionamiento evaporador Centritherm

El **evaporador centrífugo** opera en vacío a bajas temperaturas (35–60 °C) y utiliza vapor como medio de calentamiento. La cerveza por desalcoholizar entra al evaporador a través de un tubo de alimentación y boquillas de inyección (una para cada cono), que la distribuyen en la parte inferior del cono hueco giratorio. La fuerza centrífuga distribuye instantáneamente la cerveza sobre toda la superficie de calentamiento en una capa extremadamente delgada (aproximadamente 0.1 mm). La cerveza atraviesa la superficie de calentamiento en menos de un segundo. La cerveza concentrada y desalcoholizada se acumula en el borde exterior de los conos y luego sale del evaporador a través de un tubo de producto estacionario. Los vapores eliminados de la cerveza ascienden a través del centro del cono y entran en un tubo de escape que los lleva a un condensador externo. Los evaporadores Centritherm están diseñados con 1–12 conos huecos, que corresponden a capacidades de producción de cerveza sin alcohol de 0.5 a 100 hl/h, respectivamente.

El vapor se suministra al evaporador a través de un husillo hueco a la cámara de vapor de cada cono. A medida que el vapor se condensa, el condensado es proyectado inmediatamente en la pared superior de la cámara de vapor hueca. El condensado

sale de la cámara de vapor a través de un conducto y se elimina del evaporador (Fig. 4.3). Se afirma que el Centritherm tiene

4. LA CERVEZA SIN ALCOHOL

un impacto térmico mínimo y es de fácil operación, aunque la penetración de oxígeno a través de las juntas de las partes móviles se considera un riesgo potencial (Zufall y Wackerbauer, 2000a).

La **columna de cono giratorio (SCC)** es un dispositivo de contacto líquido-gas en contracorriente que utiliza fuerzas mecánicas suaves para mejorar el contacto entre fases (Figura 4.4).

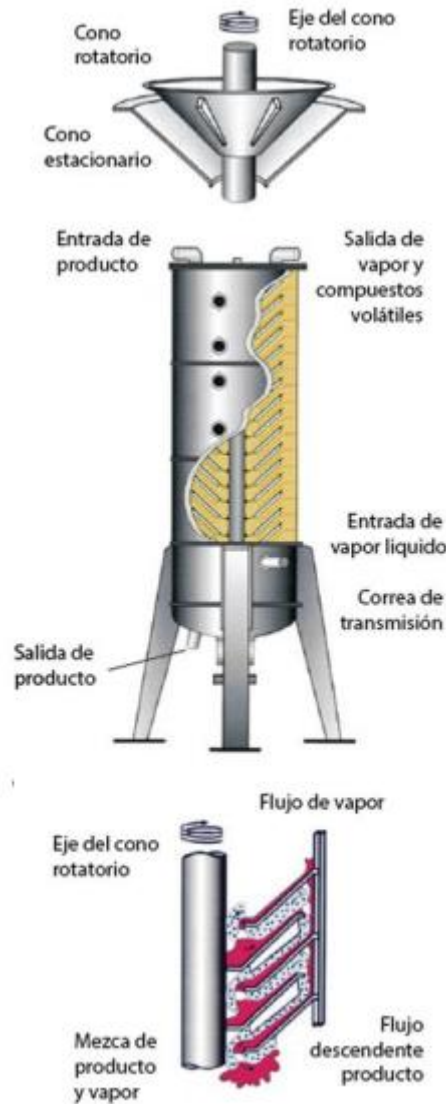


Figura 4.4. esquema del funcionamiento de una columna de conos giratorios (Conetech)

Esto permite una separación rápida y eficiente de compuestos volátiles como el etanol de una película líquida delgada (cerveza). La SCC contiene dos series de conos invertidos. Una serie de conos fijos se une a la pared interior de la columna. Otra serie de conos se une al eje giratorio, en paralelo a los conos fijos. Los conos fijos y giratorios alternan verticalmente. La cerveza de plena fortaleza se introduce en la parte superior de la columna. Arrastrada por la gravedad, fluye por la superficie superior del primer cono fijo y cae sobre el primer cono giratorio (300-500 rpm), que hace girar la cerveza en una película delgada y turbulenta. La fuerza centrífuga induce un flujo líquido ascendente hacia el borde del cono giratorio donde la cerveza cae sobre el siguiente cono fijo debajo. De esta manera, la cerveza fluye hasta el fondo de la columna. El medio de separación, el vapor generado a partir de agua desaireada, se introduce en la parte inferior de la columna y fluye hacia arriba, pasando por

4. LA CERVEZA SIN ALCOHOL

encima de la superficie de la película líquida delgada, recogiendo etanol y otros compuestos volátiles a medida que asciende. Las aletas en la parte inferior de los conos giratorios inducen un alto grado de turbulencia y un efecto de bombeo en la corriente ascendente de vapor. El flujo turbulento de líquido y vapor conduce a una transferencia de masa altamente eficiente de volátiles, de líquido a vapor (Fig.4.2). El vapor sale de la parte superior de la columna y pasa a través de un sistema de condensación, que captura los volátiles en forma líquida concentrada. La cerveza desalcoholizada se bombea desde la parte inferior de la columna. Una caída de presión baja en el SCC permite una baja temperatura de operación de 40-55 °C bajo vacío. El tiempo de residencia de la cerveza en el SCC es aproximadamente de 20 segundos, lo que es suficiente para reducir el nivel original de alcohol (5% de contenido alcohólico) a 0.01-0.03% de contenido alcohólico en un solo paso. El CO₂ residual en la cerveza de alimentación no muestra un impacto negativo (exceso de espuma) y no hay absorción de oxígeno en la cerveza que pasó por el SCC (Moreira da Silva, 2008)

Se han probado varias estrategias de producción diferentes utilizando el sistema SCC. La mejor recuperación de sabor se ha logrado mediante un proceso de dos etapas que involucra la eliminación del sabor seguida de la desalcoholización. En el primer paso a través del SCC (con una temperatura máxima de la columna 53.7 °C), la cerveza de alimentación (4.8% de contenido alcohólico) pierde prácticamente todos los ésteres y el 57% de los alcoholes superiores totales, mientras que el contenido de alcohol de la cerveza disminuye en un 1% de contenido alcohólico. Esta cerveza con un contenido reducido de alcohol (3.8% de contenido alcohólico) se desalcoholiza aún más hasta un 0.17% de contenido alcohólico durante el segundo paso a través del SCC (temperatura más alta en la columna 57.2).

A diferencia de los evaporadores centrífugos, el **evaporador de película descendente** no contiene piezas en movimiento, lo que resulta en grandes beneficios. El sistema no solo es más económico en su construcción, sino que también es más fácil de limpiar y prácticamente no hay peligro de transferencia de oxígeno a través de las diversas juntas de las partes móviles. En general, los costes de adquisición y operación de la evaporación por película descendente se consideran los más bajos de todos los sistemas de desalcoholización. Se pueden lograr mayores ahorros de energía utilizando un diseño de múltiples etapas de evaporadores de película descendente, ya que los vapores que contienen alcohol del primer evaporador se pueden utilizar como vapor de calentamiento para el segundo, mientras que el vapor del segundo puede calentar el tercer evaporador. Una cierta desventaja de este arreglo de múltiples etapas es la necesidad de operar la primera etapa a una temperatura relativamente alta (60 °C), para que la temperatura del vapor en la etapa final sea lo suficientemente alta para la eliminación del alcohol (35-40 °C).

En los evaporadores de película descendente, la cerveza original se precalienta a la temperatura de evaporación (30-60 °C a 3.5-20 kPa) y entra en la columna del evaporador a través de un dispositivo distribuidor, que asegura la formación de una película líquida uniforme en las paredes internas de los tubos. La cerveza fluye hacia abajo a temperatura de ebullición y se evapora parcialmente (Fig. 4.5). El movimiento hacia abajo es inducido tanto por la gravedad como por un flujo de vapor corriente a alta velocidad (20-80 m/s). Así, la cerveza permanece en el evaporador solo por unos pocos segundos. El vapor rico en alcohol se separa del concentrado de cerveza desalcoholizada en un separador de vapor conectado a la salida del evaporador de película descendente y finalmente se condensa en un condensador. Los calentadores, el evaporador de película descendente, el separador y el condensador están conectados a una bomba de vacío común. Dado que la cerveza que pasa a través del evaporador de película descendente no solo se desalcoholiza, sino que también se concentra, debe diluirse nuevamente con agua desgasificada hasta alcanzar el contenido de extracto original, y también es necesario carbonatarla.

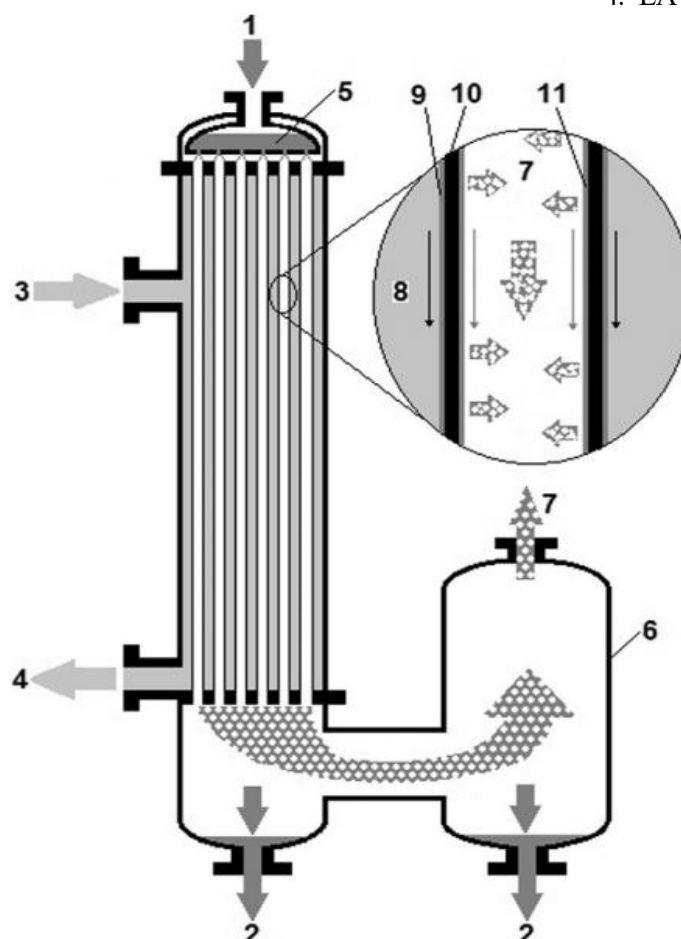


Figura 4.5- Evaporador de película descendente (Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida e Silva, 2012). (1) Alimentación de cerveza (2) Cerveza desalcoholizada (3) Entrada de vapor caliente (4) Condensado (5) Cabeza (6) Separador de vapor (7) Flujo de vapor (8) Vapor caliente (9) Película de vapor condensado (10) Pared de la tubería (11) Película de cerveza

Los principales parámetros del proceso que controlan el grado de desalcoholización en el evaporador de película descendente son el suministro de vapor de calentamiento y la temperatura de evaporación ajustable mediante la bomba de vacío. Sin embargo, se descubrió que, independientemente del grado de evaporación probado (30-55 kg de vapores de 100 kg de cerveza de entrada), hubo una pérdida significativa de alcoholes superiores totales (91-97%), mientras que los ésteres se eliminaron prácticamente por completo. En términos del contenido de alcohol, se requirió un grado de evaporación de 40/100 kg para alcanzar un contenido de alcohol de 0.5% de contenido en alcohol. Para redirigir algunos compuestos volátiles hacia la cerveza desalcoholizada, sin exceder el límite de alcohol para las AFBs, se puede usar el flujo de vapor condensado o, preferiblemente, los compuestos volátiles separados del condensado de vapor por rectificación. El balance material general de las corrientes de entrada (cerveza original) y salida (concentrado de cerveza desalcoholizada y vapor condensado) de la unidad de evaporador de película descendente mostró una pérdida de ésteres (36%) y alcoholes superiores (8%), y una acumulación general de acetaldehído (+17%), explicada por la descomposición térmica del complejo bisulfito de acetaldehído. (Brányik et al., 2012)

4.1.1.2 Procesos de membrana

Estos métodos de eliminación de alcohol se basan en el carácter semipermeable de las membranas, que separan solo pequeñas moléculas como el etanol y el agua de la cerveza hacia el líquido de permeado. En la escala industrial, se pueden distinguir dos tipos de procesos de membrana utilizados para la desalcoholización de la cerveza: la diálisis y la ósmosis inversa. Difieren en las presiones y temperaturas aplicadas, los materiales de las membranas y sus estructuras. Se sabe que todos los procesos de membrana tienen un impacto térmico menor en la cerveza, pueden operarse de manera automática y flexible, pero al mismo tiempo requieren costos de capital y operativos significativos. La viabilidad económica de los procesos de membrana para la producción de bebidas con un porcentaje de alcohol inferior al 0.45% en volumen fue cuestionada por algunos autores. (Pilipovik & Riverol, 2005)

Por otro lado, otros autores afirmaron que el requisito energético de un sistema de membrana para la purificación de alcohol (ósmosis inversa) sería significativamente menor que el de un sistema de destilación convencional (Mehta, 1982). También se sugirieron procesos de membrana como parte de un sistema para la producción continua de bebidas desalcoholizadas (Gresch, 1991, n.d.)

4.1.1.2.1 Diálisis

La diálisis es un método de desalcoholización que se basa en la transferencia de masa a través de una membrana semipermeable. Esta membrana actúa como un tamiz molecular, permitiendo el paso de ciertas moléculas, como el etanol y el agua, mientras retiene otras. El proceso de diálisis se utiliza para reducir el contenido de alcohol en la cerveza, manteniendo su sabor y características sensoriales.

El impulso detrás de la transferencia de masa en la diálisis es el gradiente de concentración de compuestos entre la cerveza y el dializado. La membrana semipermeable permite que los componentes de la cerveza se muevan desde una zona de alta concentración hacia una de baja concentración, y viceversa. La difusión molecular es el mecanismo principal de transferencia de masa en la diálisis, donde los compuestos se mueven a través de la membrana debido a las diferencias de concentración.

La diálisis se realiza generalmente a temperaturas de 1-6 °C para evitar la carga térmica en el producto. Las membranas de diálisis están compuestas de materiales como derivados de celulosa o sintéticos como polisulfona y polietersulfona. Estas membranas se disponen en módulos de fibras huecas, donde la cerveza fluye a lo largo de una membrana de diálisis mientras un líquido de dializado libre de alcohol fluye en sentido contrario por el otro lado de la membrana. Este flujo en contracorriente asegura un alto gradiente de concentración, permitiendo una óptima difusión de los compuestos.

Es esencial aplicar presión en ambos lados de la membrana para evitar la interrupción de la difusión debido a la liberación de dióxido de carbono. La presión debe ser al menos igual a la presión de saturación de CO₂ en la cerveza a una temperatura específica. Para minimizar la pérdida de CO₂ y prevenir la transferencia de oxígeno del dializado a la cerveza, se recomienda agregar una pequeña cantidad de dióxido de carbono al agua de diálisis.

Aunque la diálisis es efectiva para reducir el contenido de alcohol en la cerveza, no puede lograr una eliminación selectiva de etanol. Otros componentes de la cerveza, como alcoholes superiores y ésteres, también se eliminan en gran medida. Para evitar la pérdida de compuestos volátiles de bajo peso molecular, se pueden agregar al dializado. La velocidad y la magnitud de la desalcoholización, así como la pérdida de volátiles, se pueden controlar ajustando la relación de flujos de dializado y cerveza. (Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida e Silva, 2012)

En la siguiente figura podemos ver un proceso de diálisis completo:

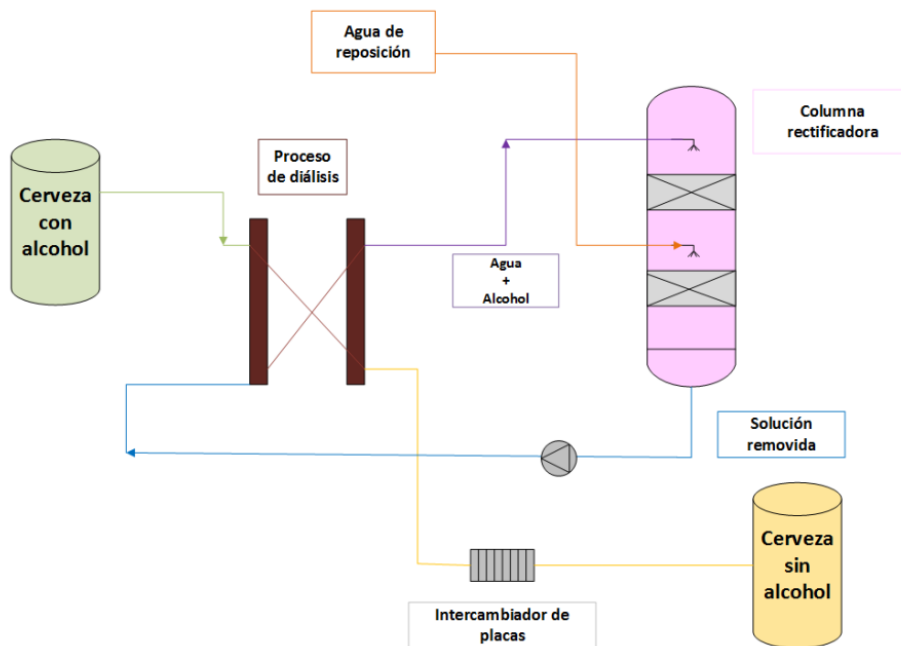


Figura 4.6 – Proceso de diálisis(Bompart, 2008)

4.1.1.2.2 Ósmosis inversa

El proceso de ósmosis inversa (RO) en la industria cervecera es un método eficaz para la producción de cervezas sin alcohol, donde la cerveza fluye tangencialmente a la superficie de una membrana semipermeable. En este proceso, el etanol y el agua se permeabilizan selectivamente a través de la membrana cuando se aplica una presión transmembrana que supera significativamente la presión osmótica de la cerveza. Esto permite la separación de los componentes deseados de la cerveza, como el alcohol, mientras que las moléculas más grandes, como los compuestos de aroma y sabor, quedan en el lado del retentado de la membrana (Catarino et al., 2006)

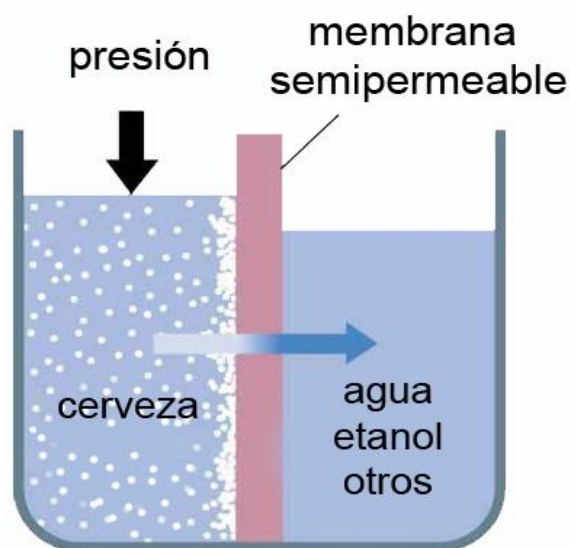


Figura 4.7-Funcionamiento ósmosis inversa en la desalcoholización de la cerveza(Lurueña, 2012)

Para llevar a cabo la ósmosis inversa, se aplican presiones transmembranales que generalmente oscilan entre 2 y 8 MPa, mediante bombas de presión, como bombas de pistón. La temperatura durante este proceso se mantiene por debajo de los 15 °C, lo que se logra utilizando intercambiadores de calor de placas (Brányik et al., 2012; Catarino et al., 2007). Las membranas utilizadas en la eliminación de alcohol de la cerveza mediante RO generalmente tienen una estructura asimétrica, con una capa activa compuesta de acetato de celulosa, poliamida o poliimida, que se coloca sobre estructuras de soporte de poliéster, polisulfona o fibra de vidrio. La elección de una membrana adecuada es crucial, y una membrana ideal debe tener características como alta permeabilidad al etanol y al agua, baja permeabilidad para otros componentes de la cerveza, resistencia a la temperatura, a los agentes de limpieza y desinfección, a la acumulación de suciedad y a la corrosión química y mecánica. Además, debe poder configurarse en relación área/volumen alto y ser económica.

La operación de RO en la producción de cervezas sin alcohol se realiza en un modo de diafiltración. En la primera fase, conocida como la fase de concentración, los permeados se eliminan de la cerveza sin reemplazarlos con agua desmineralizada. Esto provoca un aumento en la concentración de alcohol en la cerveza y, como resultado, un aumento en el flujo de solutos a través de la membrana. En la siguiente fase, la fase de diafiltración, el permeado eliminado se reemplaza cuantitativamente con agua desmineralizada. Este proceso continúa hasta que se alcanza la concentración de alcohol deseada en la cerveza. Una vez que se ha logrado el contenido de alcohol objetivo, el retentado se completa con agua desmineralizada hasta alcanzar el volumen inicial de la cerveza, lo que reduce aún más el contenido de alcohol. La diafiltración se realiza con agua estéril, completamente desmineralizada y desaireada para garantizar la pureza y calidad del producto final. Después de la ósmosis inversa, es necesario carbonatar el producto para alcanzar el nivel deseado de CO₂.

Sin embargo, es importante señalar que la ósmosis inversa puede ocasionar la pérdida de compuestos volátiles, como alcoholes superiores y ésteres, durante el proceso de eliminación de alcohol. Esto se debe a la selectividad limitada de las membranas utilizadas (Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida e Silva, 2012). Algunos estudios han evaluado varias membranas de acetato de celulosa y poliamida en condiciones de operación variables. Se encontró que aumentar la presión transmembranal resulta en un mayor flujo de permeado y un mayor rechazo de etanol y alcoholes superiores, pero un menor rechazo de ésteres. Por otro lado, disminuir la temperatura del proceso conduce a un menor flujo de permeado, pero a un mayor rechazo de compuestos de aroma (Catarino et al., 2007).

4.1.2 Producción de la cerveza sin alcohol mediante métodos de restricción del etanol

Los métodos de producción de cerveza sin alcohol basados en una formación limitada de alcohol se pueden dividir según el equipo de producción que requieran, y además subdividirse de acuerdo con alteraciones en la tecnología o el uso de levaduras especiales. Las tecnologías más explotadas son aquellas que requieren el equipo de una planta cervecera tradicional, mientras que la fermentación continua es una tecnología prometedora pero marginal. Los procedimientos respectivos aplicados a escala industrial suelen ser combinaciones de estrategias, que pertenecen a tecnologías que utilizan instalaciones de cervecería tradicionales.

4.1.2.1 Proceso de maceración modificado

El proceso de maceración involucra procesos físicos, químicos y bioquímicos (enzimáticos) complejos, cuyo propósito principal es degradar por completo el almidón en azúcares fermentables y dextrinas solubles. El espectro de azúcares formados depende de las actividades enzimáticas presentes. La b-amilasa (temperatura óptima de 62-65 °C) produce el azúcar fermentable maltosa, mientras que la a-amilasa (temperatura óptima de 72-75 °C) genera primero azúcares no fermentables (dextrinas) y en una acción prolongada también azúcares fermentables.

La cantidad final de azúcares fermentables en el mosto más tarde determinará el nivel de alcohol en la cerveza. Por lo tanto, al cambiar el proceso de maceración, es posible modular el perfil de azúcares del mosto de manera que su fermentabilidad se limite y resulte en un bajo contenido de alcohol. Un bajo contenido de azúcares en el mosto se puede lograr mediante diferentes estrategias, como las siguientes:

- **Inactivación de la b-amilasa sacarificante** mediante maceración a alta temperatura (75-80 °C). Bajo estas condiciones, la b-amilasa se inactiva rápidamente pero suficiente a-amilasa permanece para digerir y licuar el almidón. Este procedimiento resulta en una extracción de malta de aproximadamente el 85% y un mosto fermentable al 25%. El contenido final de etanol también se ve influenciado por la gravedad original del mosto, la atenuación lograda durante la fermentación y la dilución final. Según la literatura, el sabor de estas cervezas es muy bueno, sin embargo, se han reportado algunos problemas con el sabor a mosto. Las preocupaciones sobre la estabilidad coloidal del producto también son relevantes.
- **Extracción de malta con agua fría.** Se basa en extraer los compuestos de sabor de la malta al máximo sin aumentar la gravedad del mosto. La malta se extrae con agua a temperaturas insuficientes (<60 °C) para la gelatinización del almidón y la hidrólisis enzimática subsiguiente. El mosto obtenido contiene algunos azúcares fermentables, que resultan de la modificación de la cebada durante el malteado. En la práctica, podrían esperarse dificultades con el lavado, mientras que la malta restante podría utilizarse en la maceración normal. No hay información disponible sobre el uso actual de este método.
- **Remaceración de los residuos de granos** para producir un segundo extracto con muy poco azúcar fermentable. Se conocen dos modificaciones del método original: (i) cocción por extrusión de los residuos de granos antes de la segunda extracción y (ii) hidrólisis ácida de los residuos de granos para obtener un mosto secundario con un contenido significativo de pentosas no fermentables. La principal ventaja de estos métodos es que se pueden producir dos cervezas a partir de una dosis de grano. Aunque no está claro si alguien está utilizando este método, se han planteado hipótesis sobre dificultades con la formación de sabor y color, y un aumento en los costos de inversión relacionados con el aparato hidrolítico.
- Se han identificado tipos de cebada que presentan diferencias significativas en la termo estabilidad de la enzima b-amilasa, así como variantes de cebada con deficiencia en esta enzima. Aunque es posible suponer que tanto la sensibilidad al calor como la ausencia de b-amilasa en ciertas variedades especiales de cebada podrían ser beneficiosas para lograr un nivel bajo de fermentación en el mosto, hasta el momento no se dispone de información sobre investigaciones o aplicaciones industriales que involucren estas cepas de cebada

Utilizados por sí solos, los métodos que dependen únicamente de la maceración modificada rara vez tienen éxito en la producción de cervezas sin alcohol y deben combinarse con medidas adicionales como la ebullición vigorosa del mosto (para reducir el nivel de aldehídos), la acidificación del mosto, la fermentación limitada, el ajuste del color o la amargura. (Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida e Silva, 2012)

4.1.2.2 Fermentación detenida o limitada

En el contexto de la elaboración de cerveza, existen métodos específicos para detener o limitar el proceso de fermentación de manera controlada. Esta técnica es especialmente útil cuando se busca producir cervezas con bajos niveles de alcohol o sin alcohol. Sin embargo, estos enfoques presentan una desventaja importante: es complicado lograr bajos niveles de alcohol mientras se asegura que el mosto se convierta en cerveza de manera adecuada. En consecuencia, el propósito de estos métodos es mantener el contenido de etanol bajo control, ya sea eliminando las levaduras antes de que la fermentación sea excesiva (fermentación detenida) o creando condiciones para una actividad metabólica limitada de las levaduras (fermentación limitada).

Además, se busca reducir la percepción de sabor a mosto o prevenirla desde el inicio. Estos métodos utilizan equipos y procesos comunes en la producción de cerveza, pero requieren un seguimiento analítico preciso y rápido. Estos enfoques son ampliamente utilizados para crear cervezas sin alcohol o con bajo contenido alcohólico.

Para detener la fermentación de manera rápida y controlada, se puede usar el enfriamiento a una temperatura cercana a 0 °C o la pasteurización, que consiste en calentar el líquido para eliminar las levaduras fermentadoras. Otra forma es eliminar las levaduras mediante procesos de filtración o centrifugación.

Durante la fase inicial de fermentación, es posible llevarla a cabo en un rango de temperaturas variado sin que cause un impacto importante en la formación de compuestos volátiles ni en la reducción de aldehídos. Sin embargo, si la fermentación ocurre a temperaturas más altas, es necesario detenerla rápidamente, lo que puede lograrse separando las levaduras o enfriando el líquido. En estos casos, se necesita un control analítico ágil y preciso para evitar alteraciones no deseadas. Aumentar la temperatura de fermentación intensifica la conversión del mosto en cerveza y al mismo tiempo mejora la producción de compuestos volátiles y diacetilo por parte de las levaduras. Comparando diferentes tipos de levadura, se ha observado que las variedades de levadura de fermentación alta producen más alcoholes alifáticos en comparación con las de fermentación baja, pero las cervezas sin alcohol hechas con las levaduras de fermentación alta también presentan un contenido relativamente elevado de diacetilo.

Después de interrumpir la fermentación con un contenido alcohólico inferior al 0.5% en volumen, la cerveza sin alcohol suele madurarse durante al menos 10 días a temperaturas bajas para evitar sabores indeseados. Luego, se somete a procesos de filtración, carbonatación, estabilización y esterilización.

Una forma efectiva de reducir la actividad metabólica de las levaduras es utilizar bajas temperaturas. El proceso conocido como "proceso de contacto en frío" (CCP) se basa en la lenta producción de etanol a estas temperaturas, mientras que otros procesos bioquímicos, como la formación de alcoholes superiores y ésteres, así como la reducción de compuestos carbonilos, continúan en actividad moderada. En un ejemplo de CCP, se fabrica cerveza sin alcohol enfriando el mosto a temperaturas muy bajas, acidificándolo y luego inoculándolo con levaduras en concentraciones específicas. Aunque se debe tener en cuenta que, al usar concentraciones de levadura altas, el inóculo de levadura contiene un contenido significativo de etanol.

Comparado con otras técnicas de producción de cervezas sin alcohol, el CCP se destaca por una alta producción de compuestos volátiles y una capacidad limitada para reducir los aldehídos. Sin embargo, existen compuestos carbonilos en el mosto que contribuyen al sabor indeseado característico de las cervezas sin alcohol producidas mediante CCP. Para mejorar esta técnica, se han propuesto dos enfoques: uno implica utilizar cepas de levadura genéticamente modificadas que funcionen a temperaturas más altas, mientras que el otro sugiere reducir el nivel de polifenoles en el mosto mediante el uso de polivinilpolipirrolidona (PVPP) después del enfriamiento. (Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida e Silva, 2012)

4.1.2.3 Utilización de levaduras especiales

Este enfoque para la producción de cerveza sin alcohol implica el uso de cepas de levadura especiales que atraviesan un proceso de fermentación limitada. Estas cepas de levadura únicas difieren de la levadura de elaboración tradicional al producir menos o ningún etanol. Esto se puede lograr seleccionando cepas de levadura con propiedades específicas o modificando la levadura de elaboración regular mediante cambios genéticos.

Un enfoque común es aprovechar el hecho de que el azúcar fermentable principal en los mostos de malta es la maltosa. Algunas cepas de la familia de levaduras *Saccharomyces*, comúnmente utilizadas en la fermentación de vino, no pueden fermentar la maltosa. Al convertir glucosa, fructosa y sacarosa, la cerveza resultante contendrá menos del 0.5% de etanol. Este método es similar a hacer cerveza regular, pero requiere atención cuidadosa para evitar la contaminación debido a la limitada actividad de la levadura y los altos niveles de azúcares residuales.

Una cepa de levadura efectiva para producir cerveza sin alcohol es *Saccharomyces ludwigii*. Esta levadura no puede fermentar maltosa ni maltotriosa, los principales azúcares fermentables en los mostos de malta. Aunque la cerveza fermentada por *S. ludwigii* tiende a ser más dulce debido a estos azúcares, su dulzura relativa es menor que la de sacarosa y glucosa. La fermentación con *S. ludwigii* es lenta y no requiere supervisión continua. Una comparación con la levadura tradicional mostró que *S. ludwigii* produce más subproductos deseables, lo que contribuye al sabor y carácter de cerveza sin alcohol.

Otro enfoque implica pasar aire saturado de vapor a través de cerveza alcohólica para eliminar el alcohol. Los compuestos perdidos durante la desorción podrían ser compensados agregando mosto en fermentación o utilizando *Saccharomyces rouxii*, que consume etanol mientras produce sustancias con sabor activo. Sin embargo, lidiar con los efectos negativos del oxígeno en el sabor y la estabilidad sigue siendo un desafío.

Se ha propuesto un método que utiliza hongos del género *Monascus* para producir cerveza sin alcohol con bajo contenido de alcohol y alta actividad antioxidante. Sin embargo, no está claro si esta bebida califica como cerveza.

A medida que aumenta la demanda de cerveza sin alcohol, se necesitan cepas de levadura especializadas. La mutagénesis seguida de selección se ha aplicado para obtener cepas de levadura con defectos específicos en el ciclo del ácido cítrico. Estas cepas producen cerveza sin alcohol con bajo contenido de etanol y cantidades mayores de alcoholes orgánicos. También se han estudiado delecciones génicas en el ciclo del ácido cítrico, lo que lleva a cepas de levadura que producen cerveza sin alcohol similar a la obtenida mediante mutagénesis. También se ha intentado la sobreexpresión de ciertos genes, como la glicerol-3-fosfato deshidrogenasa, para reducir el contenido de etanol en la cerveza, pero con resultados mixtos.

La ingeniería genética tiene un enorme potencial para adaptar cepas de levadura a la producción de cerveza sin alcohol. Sin embargo, las preocupaciones legales y de los consumidores sobre la levadura genéticamente modificada siguen siendo obstáculos para su uso generalizado en las cervecerías.

4.1.2.4 Fermentación continua

La investigación en torno a la utilización de levaduras ya sea en estado libre o inmovilizadas, para la producción continua de cerveza ha sido impulsada por una serie de ventajas que ofrece este enfoque. Estas ventajas incluyen la reducción de los costos de inversión, producción y mano de obra en comparación con los métodos de producción tradicionales. A lo largo de los años, se han llevado a cabo varios análisis y revisiones que exploran el estado actual de los sistemas de fermentación continua de cerveza, así como las particularidades de sabor presentes en las cervezas que se fermentan y maduran de manera continua.

El principio fundamental detrás de la producción continua de cerveza radica en la aceleración de la transformación del mosto en cerveza. Esto es posible mediante la concentración aumentada de microorganismos, lograda mediante la inmovilización de levaduras dentro de un biorreactor. La inmovilización implica físicamente confinar a las levaduras en un soporte, lo que puede ser crucial para garantizar su actividad constante en el proceso de fermentación. Para este propósito, se han utilizado varios tipos de soportes, y aquellos que no interactúan químicamente, como la DEAE-celulosa, astillas de madera y granos gastados, han demostrado ser eficaces y económicos.

La elección del método de inmovilización y el diseño del biorreactor son esenciales para asegurar el éxito de la implementación industrial. Esto requiere un enfoque meticuloso para garantizar que los elementos se complementen y funcionen de manera óptima juntos. Además, debido a que la producción continua de cerveza sin alcohol se basa en la estrategia de fermentación limitada, se utilizan biorreactores de una sola etapa que incluyen dispositivos para suministrar mosto de manera continua y controlar el proceso.

A pesar de los avances en la fermentación continua de cerveza, el número de aplicaciones industriales aún es limitado. Esto se debe en gran parte a la dificultad de lograr el equilibrio adecuado de los compuestos que afectan el sabor en el producto final. Las células de levadura se comportan de manera diferente en un entorno de cultivo continuo en comparación con el proceso tradicional por lotes, lo que dificulta la adaptación de este último al enfoque continuo e inmovilizado. Aunque la producción de cerveza sin alcohol utilizando levaduras inmovilizadas puede ser más eficiente en términos de productividad, sigue siendo crucial que el producto final tenga una calidad sensorial comparable a las cervezas tradicionales.

Las cervezas sin alcohol a menudo presentan sabores desagradables y carecen del aroma frutal y agradable que se encuentra en las cervezas convencionales. Aunque se ha investigado la formación de alcoholes superiores y ésteres durante la producción continua de cerveza sin alcohol, hay pocos estudios que comparen cómo se desarrollan estos sabores en la fermentación continua en comparación con la fermentación por lotes. La cantidad de oxígeno presente durante la fermentación continua también juega un papel fundamental en la formación de sabores. Un suministro preciso de oxígeno durante el proceso puede llevar a un perfil de sabor constante y óptimo en la cerveza sin alcohol.

La elección adecuada de la cepa de levadura, el material del soporte y el diseño del biorreactor es crucial en los sistemas de fermentación continua con células inmovilizadas. La combinación correcta de estos elementos puede

mejorar tanto el rendimiento del sistema como la calidad del producto. La adaptación de cepas de levadura al método de inmovilización y al tipo de reactor es esencial para obtener resultados exitosos. Incluso en casos en que una cepa parezca no ser adecuada para producir cerveza sin alcohol a través de la fermentación detenida, bajo ciertas condiciones puede seguir siendo posible lograr un producto aceptable.

En definitiva, la investigación en la producción por fermentación continua de cerveza ha identificado ventajas económicas y de proceso, aunque aún se enfrentan desafíos en términos de mantener la calidad sensorial y el equilibrio de sabores en el producto final. La adaptación de las cepas de levadura, los métodos de inmovilización y el diseño del biorreactor son cruciales para lograr el éxito en la producción continua de cerveza sin alcohol. A medida que se superen estos desafíos, es posible que veamos una mayor adopción industrial de esta tecnología prometedora. (Brányik, Silva, Baszczyński, Lehnert, & Almeida e Silva, 2012)

4.2 Elección del método de desalcoholización de la cerveza

Sin duda alguna el método elegido a la hora de llevar a cabo la desalcoholización dependerá de las necesidades del proceso. En nuestro caso analizaremos en el siguiente punto la pervaporación como método de recuperación de aromas mediante la separación de estos de una cerveza alcohólica, para posteriormente desalcoholizarla y reincorporar los aromas. Por tanto, según estas necesidades podemos escoger un método más o menos idóneo para que el producto final sea de la mayor calidad posible.

El método habitual para producir cerveza sin alcohol implica interrumpir la fermentación (Fermentación detenida o limitada), esto se debe a que se utiliza el mismo equipo que para la fermentación estándar, lo que supone un ahorro importante de material. Por otro lado, conlleva una restricción en la reducción de compuestos de aldehído en el mosto y una consiguiente disminución en la formación de importantes especies aromáticas de la cerveza, por ello este método, así como el resto de los métodos biológicos estudiados en el punto 3.1.2 son descartables.

En cuanto a términos de preferencia industrial, la destilación al vacío es el método térmico más ampliamente utilizado para obtener cervezas desalcoholizadas de alta calidad y conservar sus características sensoriales originales. No obstante, la elección del método puede variar según la tecnología disponible en la planta de producción, la inversión requerida, la eficiencia en la desalcoholización y la capacidad de adaptación a las necesidades de producción.

Si bien la ósmosis inversa es el método de membrana más comúnmente utilizado para desalcoholizar la cerveza, es importante destacar que otros métodos de membrana, como la nanofiltración o ultrafiltración, también se han utilizado en ciertos casos para lograr la desalcoholización. La elección del método de membrana dependerá de diversos factores, incluyendo las características específicas de la cerveza a desalcoholizar y las metas de producción de la empresa cervecera.

En la tesis de (Miguel et al., 2010), cuyo objetivo es el mencionado, se estudiaron dos procesos de eliminación de etanol:

La ósmosis inversa operando en modo de diafiltración resultó eficaz para lograr un contenido de etanol en la cerveza desalcoholizada por debajo del 0,5% en volumen. Además, la cerveza se trata a temperatura ambiente o incluso más baja, lo que es adecuado para proteger los compuestos sensibles al calor. Se concluyó que la membrana de acetato de celulosa (CA) para ósmosis inversa es la más eficiente para eliminar el etanol de la cerveza debido a su mayor flujo de permeado y menor rechazo de etanol. Las condiciones operativas principales, como la presión de alimentación, la temperatura de alimentación y la velocidad de flujo de alimentación, afectan directamente al flujo de permeado y al rechazo de las membranas de ósmosis inversa. Se observó que el flujo de permeado aumenta con la presión de alimentación. El rechazo de la membrana CA al etanol y a los alcoholes superiores también aumenta a medida que aumenta la presión de alimentación, mientras que el rechazo de los ésteres disminuye. El flujo de permeado aumenta con la temperatura de alimentación, mientras que el rechazo de la membrana disminuye. La velocidad de flujo de alimentación tiene un efecto positivo en el flujo de permeado, aunque tiene un efecto marginal en el rechazo de los compuestos aromáticos (una concentración mínima de polarización). Como resultado, se deben utilizar presiones de alimentación elevadas, temperaturas de alimentación

bajas y velocidades de flujo de alimentación altas para eliminar el etanol de la cerveza y asegurar un buen rechazo de los compuestos aromáticos importantes.

A pesar de la buena eficacia de la ósmosis inversa para eliminar el etanol de la cerveza, este proceso resultó inviable para la desalcoholización industrial de la cerveza para valores muy bajos de etanol, inferiores al 0,45% en volumen. Esta desventaja está relacionada con el modo de operación de diafiltración, que conlleva un aumento significativo en el consumo de agua a medida que se elimina el etanol.

Por otro lado, se estudió el uso de una columna de cono giratorio para desalcoholizar la cerveza, ya que presenta ventajas sobre las columnas de destilación típicas. El tiempo de contacto en la columna de cono giratorio es bajo y las temperaturas de trabajo son moderadas debido al vacío aplicado. Estas características minimizan el impacto térmico en los compuestos de la cerveza. La destilación se lleva a cabo bajo flujos turbulentos elevados con una gran área de contacto entre la cerveza y el vapor, lo que resulta en una mayor eliminación de etanol. La destilación de SCC se aplicó con éxito a nivel industrial para desalcoholizar la cerveza, produciendo cerveza con menos del 0,05% en volumen de etanol.

Ambos procesos de separación conducen a una pérdida de compuestos aromáticos importantes de la cerveza, como alcoholes superiores y ésteres. Sin embargo, la destilación de SCC tiene un impacto más severo en la pérdida de compuestos aromáticos.

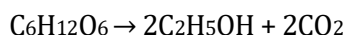
5 RECUPERACIÓN DE COMPUESTOS AROMÁTICOS MEDIANTE PERVAPORACIÓN

En este Capítulo se hará en primer lugar una revisión de los principales compuestos aromáticos que se forman durante la fermentación alcohólica de la cerveza, los cuales le aportan su sabor característico. Posteriormente, se introducirá el concepto de pervaporación y sus utilidades, y finalmente se realizará el diseño de una planta industrial de pervaporación, con su balance de materia y energía y su correspondiente selección de equipos.

5.1 Etanol y aromas formados durante la fermentación de la cerveza

Durante la fermentación de la cerveza, además del etanol, se forman una serie de compuestos aromáticos que le otorgan su sabor característico. Es por ello esencial conocer estos compuestos, para más tarde reintroducirlos en la cerveza una vez se ha desalcoholizado y perdido gran parte de estos aromas, de manera que tengamos un producto cuyo sabor y propiedades (excepto la graduación alcohólica) sean lo más parecidas al original.

Como sabemos la fermentación alcohólica se puede resumir mediante la siguiente reacción:



Sin embargo, esta reacción muestra únicamente los compuestos iniciales y finales de la fermentación alcohólica. La fermentación de los azúcares del mosto involucra varios pasos, que dan como resultado productos intermedios o secundarios.

Los azúcares del mosto (maltosa, maltotriosa y sacarosa) se convierten en glucosa, luego en piruvato en la vía glucolítica. El piruvato se descompone en dióxido de carbono (responsable de la carbonatación) y acetaldehído. Este último se reduce a etanol. Estos son los principales componentes de la cerveza junto con agua. La fermentación también crea subproductos que influyen en aroma y sabor en pequeñas cantidades. El etanol afecta el sabor y se combina con otros aromas. El dióxido de carbono es vital para la espuma, el cuerpo y la percepción aromática. Estos subproductos se dividen en compuestos de cerveza inmadura y madura.

Los componentes inmaduros de sabor en la cerveza abarcan dicetonas vecinales, aldehídos y compuestos de azufre. En altas concentraciones, estos elementos pueden afectar negativamente el aroma y sabor de la cerveza. Durante la fermentación o maduración, estos compuestos pueden transformarse. Especialmente, el diacetilo (2,3-butanodiona) y el 2,3-pentanediona, ambas dicetonas vecinales, causan un desagradable sabor a mantequilla en la cerveza debido a su bajo umbral de sabor (0,1 - 0,15 ppm). La maduración de la cerveza elimina estas dicetonas, y su cantidad se usa para evaluar el nivel de maduración. Las levaduras generan precursores de estas dicetonas (como el acetolactato para el diacetilo) durante su metabolismo en la síntesis de aminoácidos (producción de piruvato) y los liberan en el líquido de fermentación. Estos precursores se convierten en las dicetonas correspondientes fuera de las células de levadura. Las levaduras luego absorben estas dicetonas vecinales y las reducen a compuestos con un umbral de sabor más alto (como el 2,3-butanodiol para el diacetilo). Como resultado, su impacto en el sabor final de la cerveza disminuye.

Los compuestos carbonilos en el mosto son responsables de los sabores desagradables de la cerveza debido a su bajo umbral de sabor. Los aldehídos se forman principalmente durante la producción del mosto y la fermentación a partir de la descarboxilación de oxoácidos. Estos oxoácidos provienen del metabolismo de aminoácidos en la vía catabólica y del metabolismo de azúcares en la vía anabólica (ver Figura 4.1)

El acetaldehído es el aldehído más común en la cerveza y es un intermediario en la producción de etanol durante la fermentación, como se ilustra en la Figura 4.1. Durante la fermentación primaria, la levadura expulsa acetaldehído, relacionado con un sabor a "manzanas verdes" en la cerveza. Sin embargo, su concentración

disminuye debido a su conversión en etanol.

Los compuestos de azufre están presentes en la cerveza en concentraciones bajas (en el rango de partes por mil millones), lo que provoca sabores desagradables debido a su bajo umbral de sabor. El sulfuro de hidrógeno es un compuesto de azufre generado por la levadura durante el metabolismo de aminoácidos sulfurados y se libera de la cerveza durante la maduración debido a su alta volatilidad. El dimetilsulfuro (DMS) es otro compuesto de azufre que puede surgir durante la preparación del mosto, ya que su precursor se encuentra en la malta. El DMS se elimina en gran medida durante la ebullición del mosto. Cuando los precursores ingresan a la fermentación, se convierten en DMS, que se desprende junto con los gases de la cerveza, dejando solo trazas en la cerveza final.

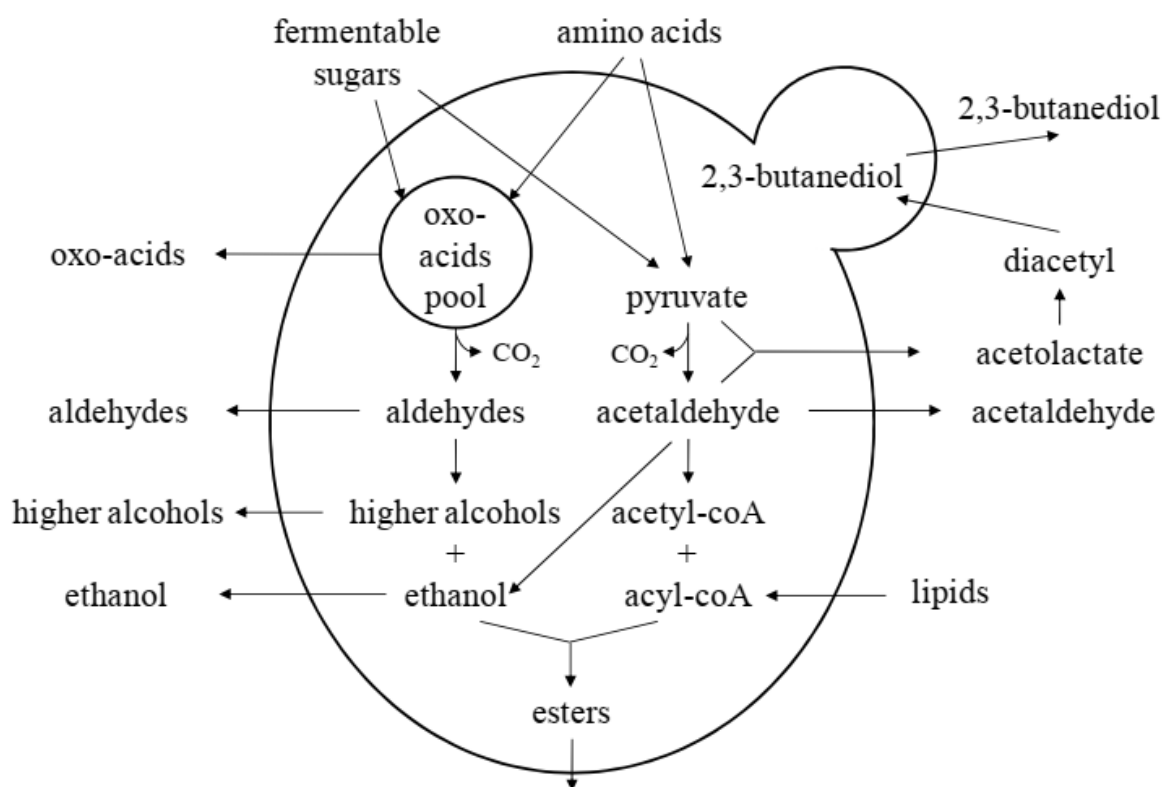


Figura 5.1- Compuestos formados durante la fermentación de la cerveza.(Miguel et al., 2010)

Los compuestos de sabor maduro de la cerveza son característicos de la cerveza terminada e incluyen alcoholes superiores y ésteres. Su concentración aumenta durante la maduración de la cerveza. La concentración de alcoholes superiores y ésteres, dentro de un rango especificado de valores, es esencial para una mayor calidad de la cerveza.

Los alcoholes superiores, que tienen una mayor concentración en la cerveza, desempeñan un papel crucial en el aroma y sabor. A veces se les llama alcoholes fusel o aceite fusel debido a su peso molecular y punto de ebullición más altos en comparación con el etanol. En la cerveza, existen varios alcoholes superiores, pero los más significativos para el aroma son el propanol, el isobutanol, el 2-metilbutanol (también conocido como alcohol amílico activo) y el 3-metilbutanol (o alcohol isoamílico). Estos alcoholes realzan el aroma alcohólico o similar al disolvente de la cerveza y también aportan una sensación de calidez en el sabor. Además, el alcohol isoamílico contribuye a un sabor dulce y afrutado. El propanol (con umbral de sabor en la cerveza de 800 mg·L⁻¹) se encuentra en la cerveza en concentraciones que varían de 7 a 14 mg·L⁻¹, mientras que el isobutanol (con umbral de sabor en la cerveza de 200 mg·L⁻¹) tiene concentraciones que oscilan entre 8 y 57 mg·L⁻¹. Los alcoholes amílicos (2-metilbutanol, con umbral de sabor en la cerveza de

70 mg·L⁻¹ y 3-metilbutanol, con umbral de sabor en la cerveza de 65 mg·L⁻¹) son los alcoholes superiores más abundantes en la cerveza, presentes en concentraciones de 27 a 122 mg·L⁻¹. A pesar de tener umbrales de sabor más altos, su impacto en el sabor final de la cerveza se debe a su interacción con otros compuestos, conocida como efecto de matriz.

Los alcoholes superiores se generan a partir de la asimilación de aminoácidos en ambas vías, la catabólica y la anabólica, como se muestra en la Figura 5.1. Los precursores de estos alcoholes son oxoácidos. En la vía catabólica, los aminoácidos absorbidos por las levaduras del caldo de fermentación se transforman en oxoácidos, que luego se descarboxilan y se convierten en acetaldehídos, que finalmente se reducen para producir los alcoholes homólogos. La Figura 5.2 presenta un esquema de cómo se forman estos alcoholes superiores a partir del metabolismo de los aminoácidos.

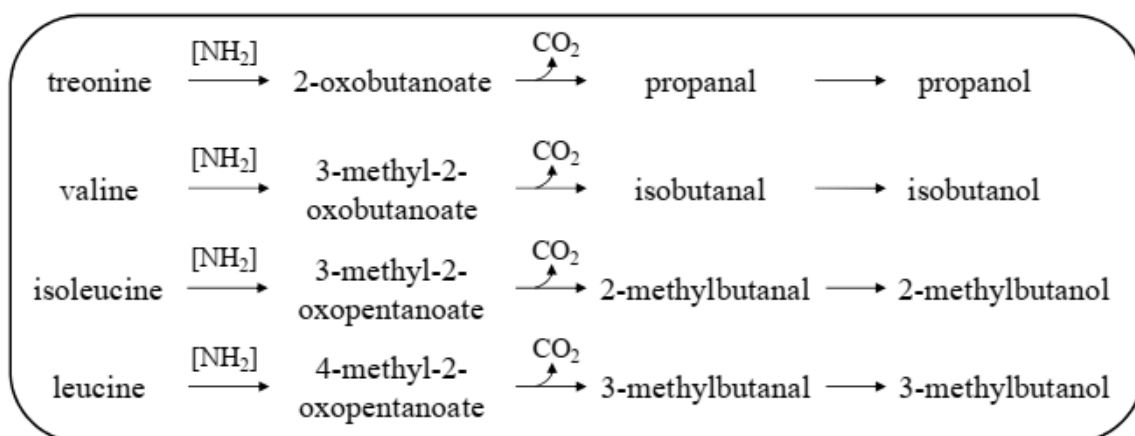


Figura 5.2- Síntesis de alcoholes superiores a través de la vía catabólica, [NH₂] representa el grupo transferido a la enzima transaminasa. (Miguel et al., 2010)

Los alcoholes superiores también desempeñan un papel importante como compuestos aromáticos, ya que actúan como precursores de otro conjunto de compuestos aromáticos conocidos como ésteres. Estos ésteres son cruciales en la creación del aroma y el sabor de la cerveza, ya que tienen umbrales de sabor extremadamente bajos. Son responsables de proporcionar a la cerveza un aroma dulce, afrutado y similar al de un perfume. El grupo principal de ésteres aromáticos se compone de los ésteres de acetato, como el acetato de etilo y el acetato de isoamilo. El acetato de etilo, que tiene un umbral de sabor en la cerveza de 30 mg·L⁻¹, añade un aroma afrutado y reminiscente de disolvente a la cerveza, y se encuentra en concentraciones que oscilan entre 8 y 48 mg·L⁻¹. Por otro lado, el acetato de isoamilo, con un umbral de sabor en la cerveza de 1.2 mg·L⁻¹, aporta a la cerveza un sabor a plátano y se encuentra en la cerveza en concentraciones que varían de 0.8 a 6.6 mg·L⁻¹. Dado que los ésteres están presentes en la cerveza en concentraciones cercanas a sus umbrales de sabor, su influencia en el perfil de sabor de la cerveza es significativa, y pequeñas variaciones en su concentración pueden tener un impacto sustancial en su sabor. La formación de ésteres ocurre durante la fermentación mediante la reacción entre alcoholes superiores o etanol y acetyl-CoA, lo que produce ésteres de acetato, o acil-CoA, ambos derivados del piruvato. El acetato de etilo es el éster más común en la cerveza, ya que se origina a partir del etanol. La Figura 5.3 ilustra la formación de estos ésteres de acetato a partir de los alcoholes homólogos y el acetyl-CoA.

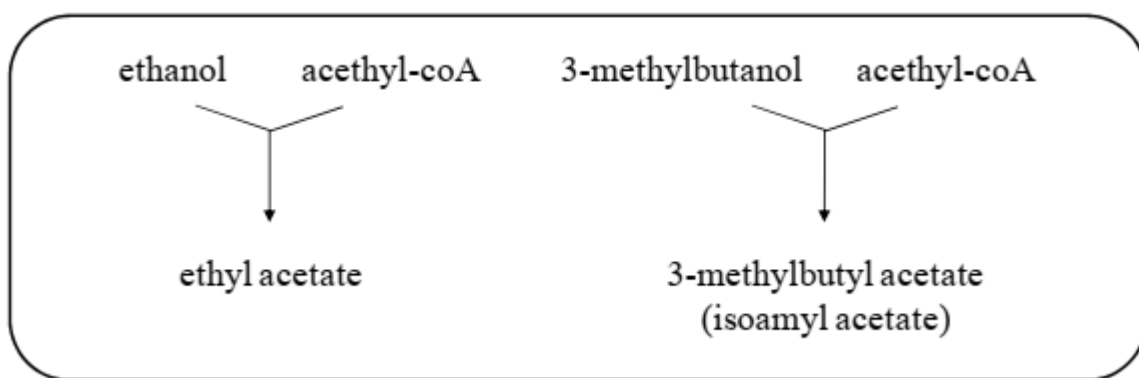


Figura 5.3- síntesis de ésteres a partir de alcoholes y reacción con acetil-CoA.(Miguel et al., 2010)

Es fundamental destacar que, más allá de la concentración de estos compuestos aromáticos, el aroma y el sabor de la cerveza también dependen de la relación entre la cantidad de estos compuestos y sus umbrales de sabor respectivos, así como de la interacción entre las concentraciones de diferentes grupos de compuestos aromáticos, como la proporción entre alcoholes superiores y ésteres (A/E). Además, las interacciones entre estos compuestos pueden tener un efecto significativo en la percepción del aroma y el sabor de la cerveza.(Miguel et al., 2010)

5.2 La pervaporación, un método prometedor

La pervaporación se considera prometedora debido a su capacidad de separar componentes selectivamente, operar a temperaturas moderadas, consumir menos energía, y encontrar aplicaciones en diversas industrias como la alimentaria y farmacéutica. También contribuye a reducir residuos, optimizar recursos y puede adaptarse fácilmente a diferentes necesidades de producción. Es una herramienta valiosa para concentración, purificación y recuperación de compuestos valiosos.

5.2.1 Principios de la Pervaporación

La pervaporación (PV) es un proceso de separación en el cual un componente específico de una mezcla líquida se evapora selectivamente al ponerla en contacto con una membrana semipermeable. Este componente preferencialmente se transporta a través de la membrana y sale en forma de vapor en el lado opuesto de la misma. Las membranas utilizadas en este proceso se eligen según el tipo de separación requerida.

La pervaporación se lleva a cabo en tres etapas esenciales: en primer lugar, los componentes de la mezcla líquida se adsorben en la membrana; en segundo lugar, los compuestos adsorbidos se difunden a través de la membrana; finalmente, ocurre la desorción en el lado del permeado.

Una de las principales ventajas de la PV es que solo es necesario evaporar una fracción de la mezcla, lo que resulta en un consumo de calor latente menor en comparación con la destilación. Esto hace que la PV sea una solución eficaz para separar mezclas azeotrópicas y compuestos con puntos de ebullición cercanos, así como para eliminar sustancias presentes en concentraciones bajas.

La pervaporación es una tecnología en desarrollo con aplicaciones destacadas en la deshidratación de compuestos orgánicos, eliminación de compuestos orgánicos de soluciones acuosas y separación de mezclas orgánicas, entre otras áreas.

La viabilidad de este proceso depende de la capacidad de lograr flujos de materia elevados junto con una alta selectividad en la separación del componente deseado. En este sentido, se han realizado importantes

investigaciones y desarrollos en los últimos diez años, centrándose en la creación de nuevas membranas y en la comprensión y modelado de los fenómenos que rigen el flujo de materia. (Belén et al., n.d.)

La pervaporación (PV) es una tecnología basada en membranas utilizada para separar componentes de mezclas líquidas. El término "pervaporación" es una combinación de las palabras "permeación" y "evaporación", ya que se refiere a un proceso de separación en el cual una mezcla líquida entra en contacto con una membrana selectiva. En este proceso, uno de los componentes de la mezcla se transporta preferencialmente a través de la membrana, saliendo en forma de vapor en el lado opuesto de la misma, como se ilustra en la Figura 5.4.

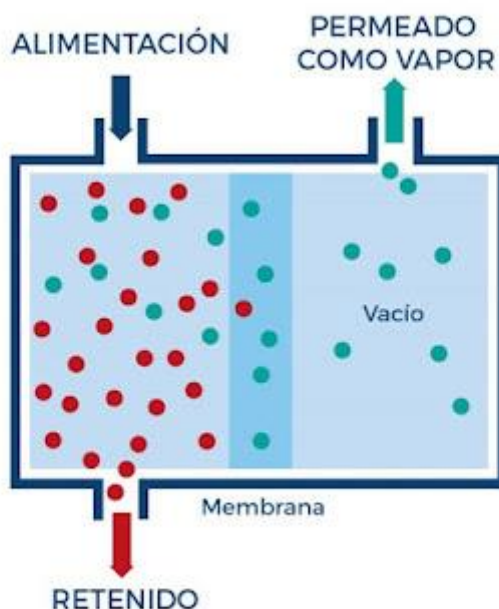


Figura 5.4- Esquema de los principios de la pervaporación

La pervaporación opera mediante un proceso de ósmosis inversa, lo que significa que solo el solvente se desplaza desde una región de alta concentración hacia una de baja concentración. Esto se logra mediante el aumento de la presión en el lado de alta concentración.

El proceso de pervaporación se desarrolla en tres etapas esenciales: primero, los componentes de la mezcla líquida son adsorbidos por la membrana; luego, estos compuestos adsorbidos difunden a través de la membrana; finalmente, ocurre la desorción en el lado del permeado, acompañada de un efecto calorífico.

La fuerza motriz para mantener una diferencia de presión en el lado del permeado se puede lograr de dos maneras: aplicando un vacío o mediante el uso de un gas de arrastre, como se muestra en la Figura 5.5.

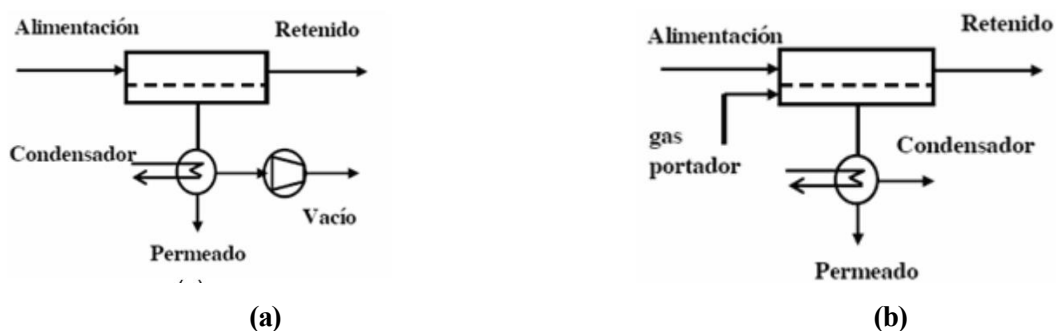


Figura 5.5- Esquema de los dos métodos de crear diferencia de presión en el permeado (Belén et al., n.d.)

El vapor resultante del proceso de permeación es rico en el componente que tiene una mayor permeabilidad selectiva y se condensa para su uso en futuros procesos. Mientras tanto, el componente retenido se enriquece en el otro componente y puede ser reciclado o utilizado en otros procesos de separación.

5.2.2 Tipos de membranas utilizadas en la Pervaporación

En su esencia, una membrana es una fina barrera que facilita el transporte selectivo de diferentes sustancias a través de ella, impulsado por gradientes de potencial, como la concentración, la presión y la electricidad. El proceso de pervaporación se basa en el mecanismo de difusión de soluciones, donde la difusividad de las sustancias a través de la membrana se determina principalmente por su tamaño y forma. El rendimiento de una membrana en la separación se relaciona con su capacidad de permeabilidad selectiva y su flujo.

Un tipo de membrana ampliamente investigado en pervaporación es el de zeolita. Estas membranas se destacan por sus características únicas, incluyendo la estructura de poros uniformes, propiedades de adsorción, estabilidad química y biológica. Las zeolitas, que son estructuras cristalinas con poros de tamaño molecular uniforme, se han utilizado extensamente en catálisis y adsorción. Recientemente, se han desarrollado membranas de zeolita de policristales continuos depositados sobre soportes porosos, que se aplican en la pervaporación en entornos de laboratorio y, en la actualidad, en la deshidratación de alcoholes y otros compuestos orgánicos a nivel comercial. Además, estas membranas ofrecen potencial para eliminar compuestos orgánicos del agua, concentrar etanol a partir de caldos de fermentación para la producción de combustibles alternativos y separar isómeros, como los xilenos o los alcanos lineales y ramificados, cuando la fracción a eliminar es pequeña.

Otros tipos de membranas utilizados en la pervaporación incluyen el Poli (alcohol vinílico) (PVA), conocido por su eficacia en la deshidratación debido a su capacidad de formar membranas de manera eficiente, ser fácil de procesar y estar ampliamente disponible. Investigaciones recientes se han centrado en el desarrollo de nuevos tipos de membranas que incorporan cargas inorgánicas selectivas, como las membranas de matriz mixta (MMM), que típicamente incorporan zeolitas en una matriz de polímero. Las membranas de matriz mixta comprenden materiales inorgánicos mesoporosos y se utilizan en operaciones de pervaporación.

Las membranas utilizadas en la pervaporación suelen ser de polímero denso y no poroso. El mecanismo subyacente se basa en las diferencias de velocidad de difusión de los componentes a través de la membrana. A menudo, se emplean para la deshidratación de disolventes orgánicos, con la fase acuosa reciclada en el sistema de pervaporación, o para eliminar compuestos orgánicos volátiles (COV) de soluciones acuosas. Sin embargo, es importante destacar que la eficiencia de transferencia de masa de muchas membranas de pervaporación aún se considera relativamente baja.

En los últimos años, las membranas compuestas principalmente de nanofibras han ganado atención debido a su estructura única y se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluida la pervaporación. El material de membrana más comúnmente utilizado en la pervaporación es el polidimetilsiloxano (PDMS). Además, se han empleado otros tipos de membranas, como el ZIF (ZIF-71), que se ha incorporado en un bloque de poliéter para la recuperación de biobutanol.

Por último, se han explorado membranas metalorgánicas (MOF), como el MOF-5, en procesos de pervaporación con disolventes orgánicos. Estas membranas aprovechan el tamizado molecular para separar moléculas orgánicas líquidas. También se han utilizado MOF en la separación agua/etanol utilizando polibencimidazol (PBI). Algunos estudios han utilizado estas redes MOF para crear membranas híbridas en aplicaciones de nanofiltración de disolventes orgánicos.

En resumen, las membranas utilizadas en la pervaporación abarcan una amplia gama de materiales y tecnologías, y su elección depende de la aplicación específica y las condiciones de funcionamiento requeridas para lograr una separación efectiva. Cada tipo de membrana tiene sus propias ventajas y limitaciones, lo que permite su adaptación a diversos procesos de separación. (Alberto Gallo García et al., 2015)

5.2.3 Aplicaciones de la Pervaporación

Las aplicaciones industriales de la pervaporación pueden clasificarse en tres grupos:

- Deshidratación de compuestos orgánicos
- Separación de mezclas orgánicas
- Separación de compuestos orgánicos del agua

5.2.3.1 Deshidratación de compuestos orgánicos

En esta aplicación específica, se emplean membranas hidrófilas que permiten la preferencial permeación del agua para llevar a cabo la deshidratación de disolventes orgánicos, particularmente de mezclas azeotrópicas. Hasta la fecha, esta aplicación sigue siendo la actividad principal de la pervaporación en la industria.(A. M. Urtiaga et al., 2007)

El uso de membranas hidrofílicas marcó el inicio de la aplicación industrial de la pervaporación para la deshidratación de disolventes orgánicos. Estas membranas tienen la capacidad de separar el agua con flujos y selectividades variables, dependiendo de la estructura química de su capa activa y su morfología. En su mayoría, las membranas hidrófilas disponibles en el mercado están fabricadas con alcohol polivinílico (PVA), el cual puede estar más o menos entrecruzado mediante agentes especiales para brindar la resistencia química necesaria en ambientes ácidos o solvatados. (Directores et al., 2017)

5.2.3.2 Separación de mezclas orgánicas

Esta es la aplicación menos desarrollada, aunque en las últimas décadas han surgido numerosos trabajos de investigación debido al alto potencial de esta tecnología para la separación de mezclas de compuestos orgánicos. Para esta aplicación se utilizan las llamadas membranas organoselectivas.(Directores et al., 2017)

Las aplicaciones industriales de pervaporación para la separación de mezclas de componentes orgánicos se utilizan especialmente en la industria petroquímica. Por ejemplo, la implementación de la pervaporación en los tratamientos de la gasolina no solo trata de reducir los compuestos aromáticos propios del combustible, sino que también se puede enfocar a la desulfuración de este, contribuyendo a la eliminación de las emisiones de SO_x en el aire.(Lin et al., 2009)

5.2.3.3 Separación de compuestos orgánicos del agua

Se trata de aplicaciones en que la concentración del compuesto orgánico en la mezcla es minoritaria. Se utilizan membranas organófilas con una permeación preferente por compuestos no polares. El ejemplo más importante para esta aplicación sería la separación de pequeñas cantidades de compuestos orgánicos en aguas contaminadas.(A. Urtiaga et al., 2002) Otra aplicación para las membranas organófilas en pervaporación sería la recuperación de compuestos aromáticos en la industria alimentaria (García et al., 2008; Pereira et al., 2005). Esta será la aplicación que analizaremos nosotros como método de recuperación de aromas en la cerveza sin alcohol.

Por lo tanto, la pervaporación se puede dividir principalmente en dos procesos principales: pervaporación hidrófila y pervaporación organófila. Figura 5.6

- La pervaporación hidrófila utiliza una membrana hidrofílica para deshidratar soluciones orgánicas altamente concentradas. El agua es el compuesto que permea preferencialmente.
- La pervaporación organófila utiliza una membrana hidrofóbica para recuperar pequeñas cantidades de compuestos orgánicos diluidos en agua. Por lo tanto, se utiliza para mezclas altamente diluidas. El compuesto orgánico es el que permea preferencialmente.

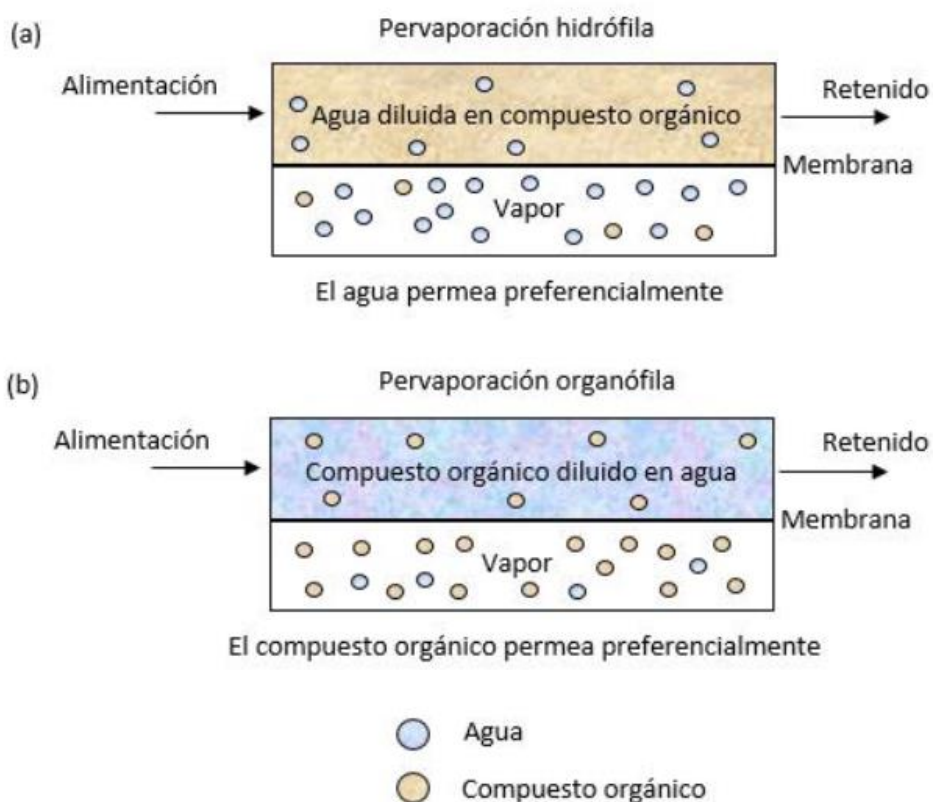


Figura 5.6- Esquema de procesos de pervaporación (a) hidrófila y (b) organófila. (Directores et al., 2017)

5.3 La pervaporación como método de enriquecimiento sensorial de la cerveza sin alcohol

El perfil aromático de la cerveza está compuesto por numerosos compuestos orgánicos volátiles presentes en concentraciones muy bajas (a nivel de partes por millón), como hemos explicado en el punto 5.1, los cuales son responsables de su sabor (Catarino et al., 2007; Tan et al., 2005). En la composición de la cerveza se encuentran compuestos de diversas clases químicas, como alcoholes, ésteres, aldehídos, lactonas, ácidos carboxílicos y fenoles, que le confieren a la cerveza un sabor específico (Karlsson & Trägårdh, 1997; Trifunovic & Trägårdh, 2002). Los ésteres son los responsables de los sabores dulces y afrutados de la cerveza, mientras que los alcoholes superiores, que constituyen la principal categoría de compuestos aromáticos en esta bebida, le

confieren un sabor alcohólico, afrutado e inmaduro. El aldehído más importante en la cerveza es el acetaldehído, y está asociado a la frescura de la bebida (Börjesson et al., 1996; Sampranpiboon et al., 2000). La relación entre las concentraciones totales de alcoholes superiores y ésteres es un indicador importante para evaluar el sabor de la cerveza, ya que indica si la cerveza tiene un carácter más alcohólico o afrutado.

Durante el procesamiento de bebidas, como el proceso de desalcoholización, se produce una pérdida de ciertos compuestos aromáticos. Esta pérdida puede tener un impacto negativo en la calidad sensorial del producto final. En el caso de las bebidas con bajo contenido de alcohol, es esencial asegurarse de que su perfil aromático se asemeje lo más posible al de la cerveza original para mantener su atractivo para los consumidores. En la industria de las bebidas, es una práctica común mejorar el perfil aromático de las cervezas desalcoholizadas mediante la adición de compuestos aromáticos. Estos compuestos pueden ser adquiridos comercialmente u obtenidos de la propia cerveza procesada. La última opción es preferible porque los compuestos aromáticos extraídos de la bebida original tienden a tener un mayor valor comercial (Kaddour Djebbar et al., 1998; Lipnizki et al., 2002). Este capítulo se centra en un proceso novedoso que implica la extracción de compuestos aromáticos de la cerveza original, antes del proceso de desalcoholización, utilizando la pervaporación. Estos compuestos aromáticos extraídos se agregan luego a la cerveza desalcoholizada para mitigar la pérdida de compuestos aromáticos y mantener el perfil aromático deseado. (Catarino et al., 2009)

Hoy en día existen varios métodos disponibles para la recuperación de aromas, y entre ellos, los procesos de membrana como la pervaporación son particularmente atractivos. Los procesos de membrana ofrecen una excelente selectividad, y la pervaporación, en particular, se puede llevar a cabo a bajas temperaturas. Esta característica es vital para preservar la integridad de los compuestos sensibles a la temperatura que se encuentran en la cerveza (Pereira et al., 2005; Tan et al., 2005). Además, la pervaporación es un proceso eficiente desde el punto de vista energético que no requiere aditivos químicos. Logra la separación a través de medios físicos, lo cual a menudo se prefiere en comparación con otros tipos de métodos de separación. (Lipnizki et al., 2002; Shepherd et al., 2002; Tan et al., 2005; Trifunovic & Trägårdh, 2002)

En este punto realizaremos el diseño de un sistema de pervaporación industrial cuyo objetivo es desarrollar una cerveza sin alcohol recuperando sabores de la cerveza convencional (cerveza alcohólica) mediante pervaporación e incorporándolos posteriormente a la cerveza sin alcohol.

5.3.1 Diseño de una planta industrial de recuperación de compuestos aromáticos mediante un sistema de pervaporación

La Figura 5.7 muestra el diagrama de bloques del proceso para producir cerveza sin alcohol mediante la integración de la pervaporación (PV) para la extracción de compuestos de aroma y la destilación por columna de cono giratorio (SCC) para eliminar el etanol. En el primer paso del proceso, se realiza la pervaporación de una fracción de la cerveza alcohólica no carbonatada para extraer los compuestos de aroma. El flujo de retentado de la unidad de pervaporación se agrega a la alimentación de la unidad de destilación SCC. En la unidad de SCC, la alimentación entra en contacto con una corriente de vapor en contra que elimina el etanol (y otros compuestos volátiles). Finalmente, los compuestos de aroma de la unidad de pervaporación y una fracción de cerveza alcohólica fresca se agregan a la cerveza desalcoholizada para equilibrar su falta de compuestos de aroma

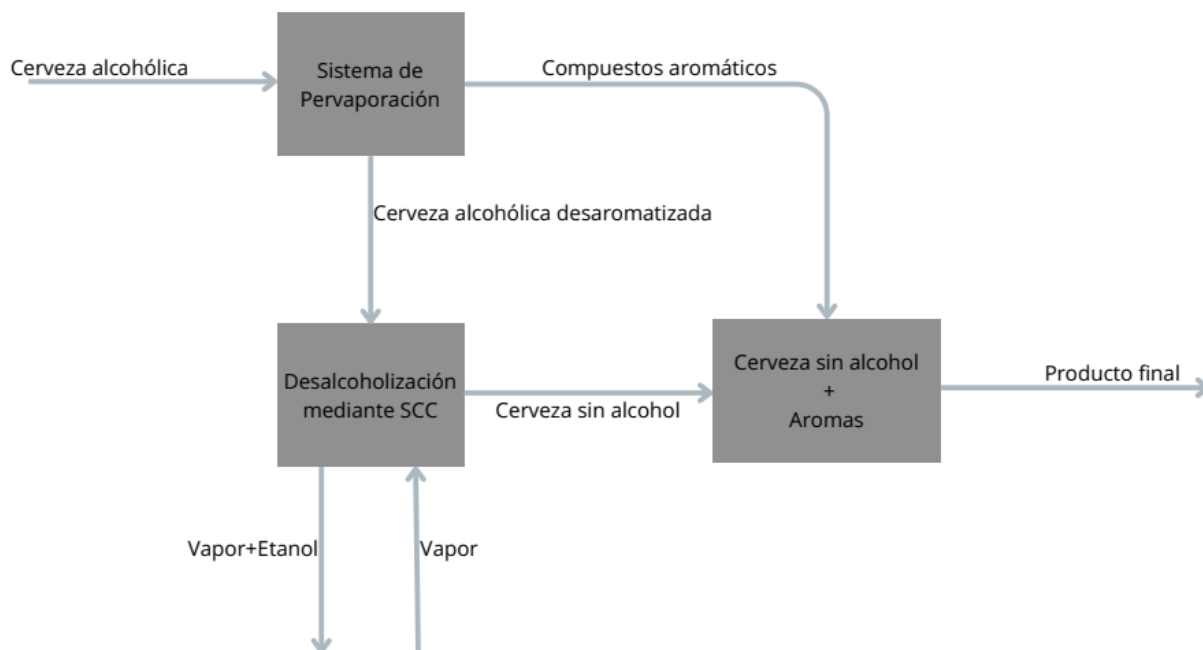


Figura 5.7 Diagrama de flujo de un sistema de recuperación de compuestos aromáticos, desalcoholización y reincorporación de compuestos aromáticos de la cerveza.

La extracción de compuestos de aroma de la cerveza se lleva a cabo en una planta industrial, como se ilustra en la Figura 5.8. Una fracción del flujo original de cerveza se bombea de forma continua a cuatro módulos de membrana organizados en dos conjuntos de dos módulos cada uno (Sistema de membranas por pervaporación), utilizando membranas compuestas POMS/PEI con un área efectiva total de 40 m². La bomba de alimentación (B1) controla el caudal de entrada hasta una diferencia de presión máxima entre la entrada (alimentación) y la salida (retentado, cerveza desaromatizada) del módulo de membrana de 2 bar.

Antes de la entrada al conjunto de módulos de membrana, el flujo de alimentación pasa a través de un intercambiador de calor de placas (IC1) para controlar la temperatura. Una bomba de vacío de paletas rotativas (B2) mantiene el lado del permeado del conjunto de módulos de membrana bajo presión subatmosférica. El vacío facilita la transferencia de masa de los compuestos de aroma de la cerveza al lado del permeado y la evaporación subsiguiente en el lado aguas abajo de las membranas.

La planta se configuró para operar en modo por lotes en lo que respecta a la recuperación del permeado. En esta realización, el flujo de permeado se conduce al conjunto de cuatro condensadores (SC), donde se condensa a alrededor de -85 °C. Un circulador de enfriamiento y calentamiento (CH) suministra el fluido térmico que condensa el permeado. Después del paso de extracción, el fluido térmico se calienta a 40 °C y se circula agua caliente en los condensadores para descongelar el permeado, que se recoge en el tanque de aroma (RP) y luego se descarga y almacena en contenedores. Los compuestos no condensables, como el dióxido de carbono, se expulsan a través de la salida de la bomba de vacío (B2).

El flujo de retentado (corte de etapa de aproximadamente 0.1 a 1.1%), que corresponde a una cerveza parcialmente agotada, se alimenta a la unidad de desalcoholización SCC.

5. RECUPERACIÓN DE COMPUESTOS AROMÁTICOS MEDIANTE PERVAPORACIÓN

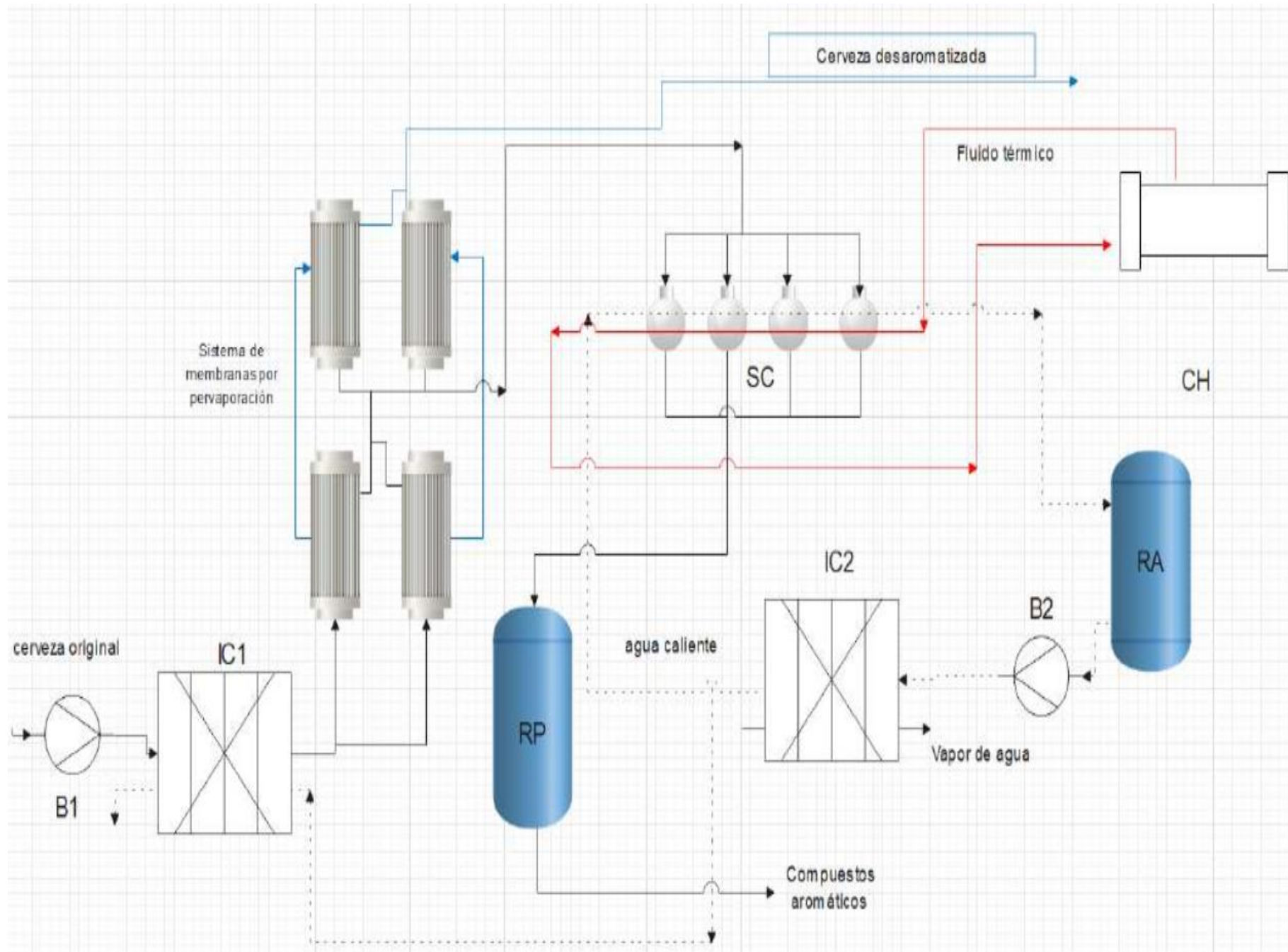


Figura 5.8 Diagrama de flujo del diseño de una planta industrial de pervaporación

En cuanto a las condiciones de operación, basándonos en la literatura y experimentos a escala laboratorio como el visto en (Miguel et al., 2010), asumimos los siguientes datos:

La unidad de pervaporación emplea cuatro módulos de membrana de tipo placa y marco hechos de POMS/PEI (40 m²) y funciona con una presión en el rango de 1 mbar a 8 mbar para el permeado, así como con una temperatura de condensación entre -75 °C y -85 °C. Se realizaron diversos experimentos de pervaporación para evaluar cómo la temperatura y la cantidad de flujo de alimentación influyen en la extracción de los compuestos aromáticos. Se determinó que estas variables de operación impactan en la presión del permeado y la temperatura de condensación. Las condiciones óptimas logradas fueron una temperatura de alimentación de 25 °C y un flujo de alimentación de 500 L/h (con un corte de etapa de alrededor de 1.1%). Estas condiciones permiten obtener la máxima cantidad de permeado y un equilibrio adecuado en el perfil de aroma. Para contrarrestar la falta de aroma, se añade aproximadamente un 0.3 vol.% de extracto de aroma y un 5-10 vol.% de cerveza fresca a la cerveza desalcoholizada, asegurando que la concentración de etanol no supere el límite del 0.5 vol.%.

5.3.2 Balance de materia

Para llevar a cabo el Balance de materia en primer lugar nos basamos en los datos proporcionados en el trabajo experimental de (Miguel et al., 2010). Como datos de partida tenemos caudal de alimentación de 500 L/h de cerveza original, un flujo de permeado de $J_P = 3,82 \times 10^5$ Kg/m²s, un área efectiva de membranas de 40 m², y la composición en compuestos aromáticos de la alimentación y permeado.

En primer lugar, obtenemos el caudal de permeado sabiendo que:

$$J_P = \frac{M_P}{A} \quad (1)$$

Donde:

M_P = caudal de permeado o extracto de aroma, L/h

J_P = es el flujo específico y se define como el volumen producido de permeado por unidad de superficie de membrana instalada y unidad de tiempo.

A = área efectiva de la membrana

Por tanto:

$$M_P = 3,82 \times 10^5 \times 40 = 5,501 \text{ Kg/h}$$

Sabiendo que

$$M_F = M_P + M_R \quad (2)$$

Donde:

M_F = caudal de alimentación, L/h

M_R = caudal de retentado o cerveza desaromatizada, L/h

Se obtiene los caudales de la Tabla 1

Tabla 1- Caudales Sistema de membranas

Alimentación (L/h)	500
Permeado (L/h)	5,5
Retentado (L/h)	494,49

Además, nos basamos en la composición de una cerveza Pilsen para obtener la composición en compuestos aromáticos en la alimentación. También, podemos suponer la concentración aromática en el permeado basándonos en los experimentos mencionados. Estas composiciones vienen reflejadas en la Tabla 2 en las columnas de alimentación y permeado. Con ello podemos obtener la composición aromática en el retentado, que será la menor con menor presencia de compuestos aromáticos.

$$M_F \cdot C_F = M_P \cdot C_P + M_R \cdot C_R \quad (3)$$

Siendo:

C_F = concentración del componente i de la solución en la alimentación expresada en mg/l

C_P = concentración del componente i de la solución en el permeado expresada en mg/l

C_R = concentración del componente i de la solución en la retentado expresada en mg/l

Tabla 2-Concentraciones de los Caudales

	Alimentación	Permeado	Retentado
C_{Pr} (mg/L)	20.30	72.64	19,72
C_{iB} (mg/L)	12.87	106.36	11,83
C_{AA} (mg/L)	83.86	841.7	75,429
C_{EA} (mg/L)	20.27	249.67	17,718
C_{iAA} (mg/L)	1.37	39.82	0,942
C_{AC} (mg/L)	5.06	6.24	5,0468

Los componentes estudiados son:

C_{Pr} =Concentración de Propanol expresada en mg/L

C_{iB} = Concentración de Isobutanol expresada en mg/L

C_{AA} = Concentración de Alcohol amílico expresada en mg/L

C_{EA} = Concentración de Etilacetato expresada en mg/L

C_{iAA} = Concentración de Isoamilacetato expresada en mg/L

C_{AC} = Concentración de Acetaldehído expresada en mg/L

5.3.3 Balance de energía

Los equipos donde ocurren intercambio de calor son:

- Intercambiador de Calor 1
- Intercambiador de Calor 2
- Sistema de condensadores

Intercambiador de Calor 1

$$Q = M_F \times C_{PF} \times (t_1 - t_2) = M_A \times C_{PA} \times (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Donde:

M_F = caudal de alimentación de cerveza original = 500 L/h = 500 Kg/h

C_{PF} = Poder calorífico del caudal de alimentación = 4,12 KJ/Kg K

t_2 = Temperatura cerveza de entrada = 2°C

t_1 = Temperatura cerveza de salida = 25°C

$$Q = \frac{500}{3600} \times (4,12) \times (25 - 2) = 13,161 \text{ KW}$$

M_A = caudal de agua de caliente = 500 Kg/h

C_{PA} = Poder calorífico corriente agua caliente = 4,18 KJ/Kg K

T_1 = Temperatura de salida de la corriente de agua = 35°C

$$13,161 = \frac{500}{3600} \times (4,18) \times (35 - T_2)$$

T_2 = Temperatura de entrada de la corriente de agua = 57,67°C

Intercambiador de calor 2

$$Q = M_V \times \Delta H = M_A \times C_{PA} \times (T_2 - T_3) \quad (5)$$

M_V = caudal de vapor = 40 kg/h

ΔH (150°C, 5 bar) = (2749-640) = 2109 KJ/Kg

$$Q = \frac{40}{3600} \times 2109 = 23,43 \text{ KW}$$

M_A = Caudal de agua =500 Kg/h

C_{PA} = Poder calorífico del agua = 4,18 KJ/Kg K

T_2 =Temperatura de salida del agua del intercambiador=57,67°C

$$23,43 = \frac{500}{3600} \times 4,18 \times (57,67 - t_1)$$

T_3 =Temperatura de entrada del agua al intercambiador=17,31°C

Sistema de condensadores:

$$Q = M_{FT} \times C_{P,FT} \times (T_{FT2} - T_{FT1}) = M_P \times C_{P,P} \times (t_1 - t_3) \quad (6)$$

M_{FT} =Caudal de fluido térmico (Aceite térmico Marlotherm XC)=1 kg/h

$C_{P,FT}$ = Poder calorífico corriente fluido térmico (Aceite térmico Marlotherm XC) = 1,6 KJ/Kg K

T_{FT2} = Temperatura de salida del fluido térmico= 40°C

T_{FT1} =Temperatura de entrada del fluido térmico= -85°C

$$Q = \frac{1}{3600} \times 1,6 \times (40 + 85) = 0,055 \text{KW}$$

M_P = caudal de permeado que entra a 1 condensador =1,3752 Kg/h

$C_{P,P}$ = poder calorífico permeado aromas (tomamos la misma que para la cerveza) = 4,12 KJ/Kg K

t_1 =Temperatura de entrada del permeado al condensador=25°C

$$0,055 = 1,3752 \times 4,12 \times (25 - t_2)$$

t_3 = Temperatura de salida del permeado del cruzamiento con el fluido térmico=-10,29°C

5. RECUPERACIÓN DE COMPUESTOS AROMÁTICOS MEDIANTE PERVAPORACIÓN

Para descongelar la corriente de permeado se hace pasar una corriente de agua por el condensador:

M_{A2} =Caudal de agua que entra al condensador= 3kg/h

$C_{P,A}$ = Poder calorífico corriente agua caliente= 4,18 KJ/Kg K

T_3 =Temperatura de entrada de agua al condensador=17,31°C

T_4 =Temperatura de salida de agua del condensador=10°C

$$Q = \frac{3}{3600} * 4,18 * (17,31 - 10) = 0,0254KW$$

M_P = caudal de permeado que entra a 1 condensador =1,3752 Kg /h

$C_{P,P}$ = poder calorífico permeado aromas (tomamos la misma que para la cerveza) =4,12 KJ/Kg K

t_3 = Temperatura de salida del permeado del cruzamiento con el fluido térmico = -10,29°C

$$0,0254 = \frac{1,3752}{3600} * 4,12 * (T_3 + 10,29)$$

t_4 =Temperatura de salida del permeado del condensador=5,84°C

Estos cálculos se han realizado para un solo condensador.

5.3.4 Selección de los equipos

Intercambiadores de calor de placas:

Los intercambiadores de calor de placas (PHE) o portadores de calor de placas (PHC) son un tipo de intercambiador de calor que utiliza placas metálicas dispuestas en paralelo. Al igual que otros tipos de intercambiadores de calor, permiten transportar energía térmica entre dos materiales. Tienen muchos usos, como en la tecnología convencional de calefacción y refrigeración, los sistemas de energía renovable y la preparación de agua caliente.

La transferencia de calor en un intercambiador se produce en placas interconectadas con cámaras onduladas superpuestas (colocadas en capas), las sustancias pasan entre las cámaras de éstas. La cantidad de transmisión de energía viene determinada por la dirección del flujo, que es contracorriente, co-corriente o cruzado. El flujo en contracorriente tiene la mayor transferencia de energía porque las dos corrientes chocan entre sí.

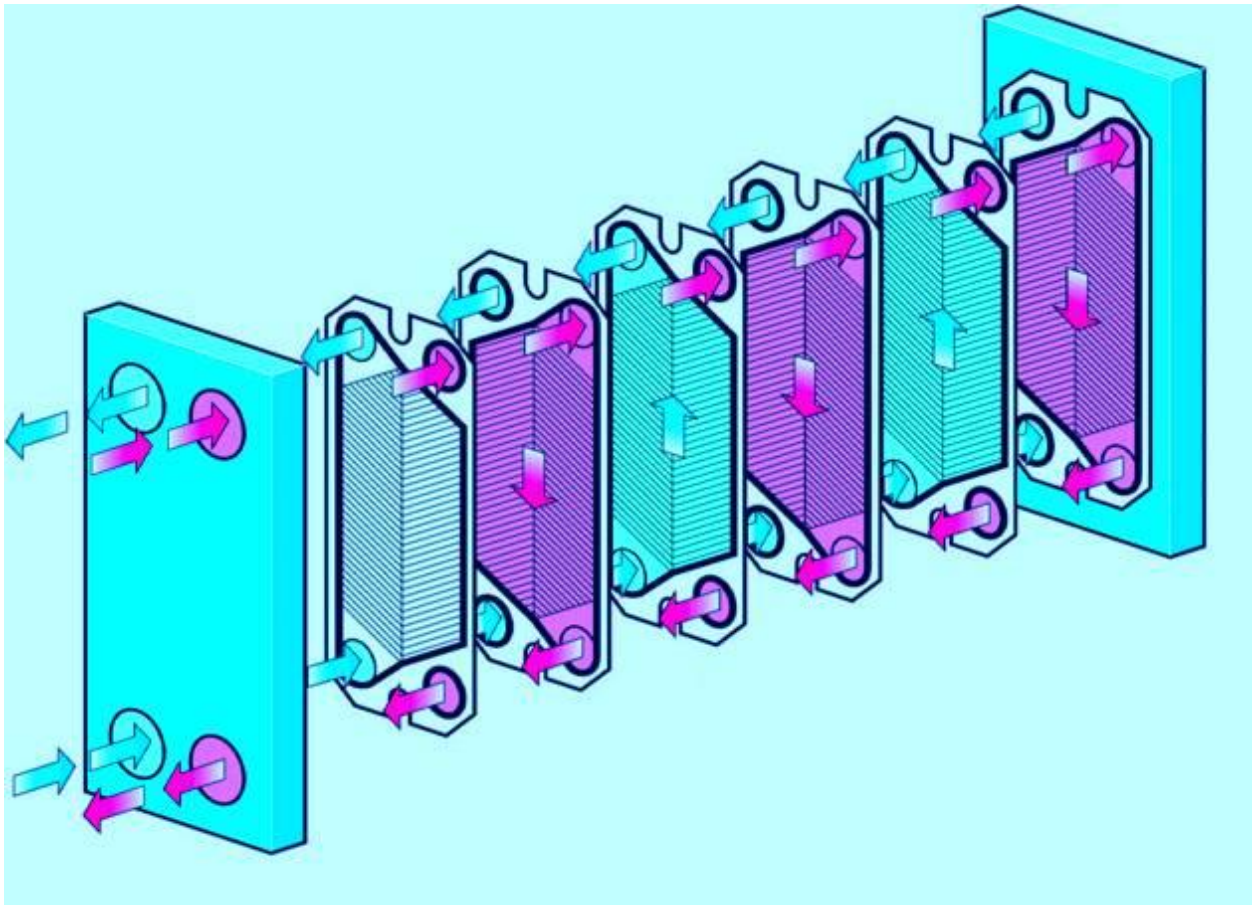


Figura 5.9-Intercambiador de calor de placas (FM GRUPO TECNOLÓGICO, n.d.)

Los intercambiadores de calor de placas se utilizan en una gran variedad de aplicaciones industriales. Algunos de los usos más comunes son:

- Calefacción y refrigeración
- Procesamiento químico y petroquímico
- Procesamiento de alimentos y bebidas
- Generación de energía

Los intercambiadores de calor de placas son capaces de transferir energía térmica con mayor eficiencia que otros tipos de intercambiadores. Esto significa que pueden utilizarse para lograr los mismos resultados con menos aporte de energía.

Los intercambiadores de calor de placas son muy compactos, por lo que son ideales para su uso en espacios reducidos.

Los intercambiadores de calor de placas son fáciles de limpiar y mantener, lo que reduce el tiempo de inactividad y mantiene sus líneas de producción funcionando sin problemas.(FM GRUPO TECNOLÓGICO, n.d.)

Intercambiador de calor tubular:

Un intercambiador de calor tubular, también conocido como intercambiador de carcasa y tubos, es un equipo diseñado para calentar o enfriar un producto mediante la transmisión térmica generada al cruzarse en el cruce de dos fluidos por diferentes compartimentos.

Los intercambiadores de calor tubulares consisten en dos cámaras de presión independientes: la carcasa y el haz tubular.

Por estas cámaras fluyen dos medios de tal forma que cuando existe una diferencia de temperatura entre ellos, el calor se intercambia sin que los medios se mezclen.

Los componentes básicos de un intercambiador tubular son:

- **Haz tubular:** Los tubos proporcionan la superficie de transferencia de calor entre el fluido que circula por su interior y el fluido que circula por la carcasa. Alojan el fluido secundario, es decir, el producto a calentar.
- **Placa tubular:** Es una placa de metal perforada para albergar los tubos, los cuales se fijan mediante expansión o soldadura.
- **Deflectores:** Son placas segmentadas dispuestas a lo largo del intercambiador. Sirven para mantener los tubos en la posición adecuada y obligar al fluido primario a que circule perpendicularmente al haz tubular.
- **Carcasa y conexiones:** La carcasa es la envolvente del fluido primario y consiste en un cilindro soldado a las placas tubulares. Dispone de conexiones para la entrada y salida del fluido secundario.
- **Cabezales desmontables:** Elementos conectados a las placas tubulares por ambos extremos, para facilitar la circulación del producto por el haz tubular. Pueden disponer de placas para partición del haz tubular, con el fin de conseguir que el fluido circule por varios pasos.



Figura 5.10 – Intercambiador de calor tubular(RETECNO S.L, 2023)

Bomba de impulsión de caudal:

esta máquina tiene la tarea de impulsar el producto inicial hacia el proceso. Su estructura incluye un rotor con palas que gira a una velocidad específica, convirtiendo la energía mecánica en energía transmitida al fluido en forma de aumento de presión y energía cinética. En este tipo de bombas, se pueden distinguir diversos tipos según cómo circula el fluido en el rotor de impulso.

- Máquina cinética de circulación radial: el fluido ingresa por el centro del rotor, circula a través de canales delimitados por las palas siguiendo aproximadamente la dirección radial y sale por una voluta periférica donde se ubica la salida de impulso.
- Máquina cinética de circulación axial: el fluido circula en dirección paralela al eje de rotación del rotor impulsor.
- Máquina cinética de circulación mixta: la circulación del fluido se encuentra entre los dos extremos mencionados anteriormente.

Los componentes principales de una bomba centrífuga son los siguientes:

- Boca de entrada: ubicada en el eje de la máquina, es por donde el fluido entra y está diseñada para conectarse a la tubería de entrada.
- Rotor impulsor: compuesto por un disco con palas, que puede ser cerrado o abierto, y es el encargado de convertir la energía mecánica en energía hidráulica.
- Voluta de recogida: un canal circular que recorre el fluido impulsado por el rotor impulsor. Su función principal es convertir gran parte de la energía cinética del fluido en presión.
- Boca de salida: un conducto tangencial insertado en la voluta de recogida, por donde sale el fluido impulsado y está adaptado para conectarse a la tubería de salida.
- Cuerpo de la bomba: la carcasa que contiene todos estos elementos esenciales mencionados anteriormente.
- Sello mecánico: su función es restringir la fuga de fluido a través del eje de accionamiento de la bomba.
- Cojinetes: componentes que mantienen la posición del eje de accionamiento y soportan la carga axial creada por el rotor impulsor. (Jutglar, 2012)

La bomba de impulsión escogida para esta planta de pervaporación es Electrobomba ENOS 20 del fabricante Polsinelli



Figura 5.11- Bomba de impulsión del fabricante Polsinelli(Polsinelli, 2023)

Compuesta por un motor de 230 V y un impulsor de acero inoxidable AISI 304, la bomba centrífuga eléctrica Enos 20 es un producto de calidad para el trasvase de líquidos alimentarios, perfecto para transportar vino, cerveza, aceite y fruta. El motor eléctrico tiene una potencia de 0,33 kW y alcanza 2800 rpm. El impulsor permite trasvasar hasta 28 litros por minuto (1680 lt/h), y el sistema de aspiración bidireccional es capaz de trabajar incluso en presencia de discontinuidad en el líquido. Los racores de la bomba eléctrica Enos 20 miden $\varnothing$ 20 mm, y el instrumento pesa un total de 4,8 kg. La bomba eléctrica Enos 20 es fácil de transportar gracias al asa aplicada

al chasis. Se vende con conectores de manguera de acero inoxidable. El instrumento es adecuado para trasvasar líquidos calientes como la cerveza.(Polsinelli, 2023)

Bomba de vacío:

Una bomba de vacío es un dispositivo utilizado para extraer gases y crear un vacío parcial o completo en un contenedor cerrado. Su función principal es reducir la presión en un espacio sellado al extraer moléculas de gas, generando un ambiente con una presión más baja que la atmosférica. Esto es esencial en diversas aplicaciones industriales, científicas y tecnológicas, donde un vacío controlado es necesario para llevar a cabo procesos específicos.

Las bombas de vacío son fundamentales en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo la industria química, la fabricación de dispositivos electrónicos, la investigación en laboratorios, la metalurgia, la producción de alimentos y muchas otras.(John & Hähnlein, 2011)

La bomba de vacío escogida es la bomba de paletas rotativas de dos etapas CRVpro 2 del fabricante Welch



Figura5.12- bomba de vacío CRV pro-2

Cuyas especificaciones principales son una máxima capacidad de bombeo 2.5 m³/h (42 l/min) y una presión máxima de 3x10⁻³ mbar.

Condensadores:

En una planta de pervaporación, un condensador cumple una función fundamental en el proceso de extracción de compuestos volátiles y aroma de líquidos, como en el caso de la cerveza. A continuación, se describe de manera general cómo funciona un condensador en este contexto:

El condensador en una planta de pervaporación se utiliza para condensar los compuestos volátiles o aromas extraídos del líquido, que pasan a través de las membranas en el proceso de pervaporación. Estos compuestos se encuentran en forma de vapor en la corriente de permeado después de pasar por las membranas. El condensador enfría el vapor, convirtiéndolo nuevamente en líquido y recolectando así los compuestos de aroma en forma líquida para su posterior uso o almacenamiento.(McKelvy, 2000)

Para el sistema de condensadores podemos utilizar 4 condensadores de vapor S&T ST del fabricante Kelvion Germany GmbH



Figura 5.13- Condensador de vapor del fabricante Kelvion Germany GmbH

Tanque de almacenamiento

En un sistema de pervaporación, los tanques de almacenamiento desempeñan un papel crucial en la recolección y almacenamiento de los productos obtenidos después del proceso de pervaporación.

Después de que el vapor permeado, que contiene los compuestos deseados, pasa a través de las membranas y se condensa en el condensador, se recopila en un tanque de almacenamiento. Estos tanques están diseñados para mantener el producto recolectado en condiciones adecuadas, como la temperatura y la presión, para preservar sus propiedades y calidad. Además, proporcionan un lugar seguro para almacenar el producto antes de su posterior procesamiento, uso o distribución.

Para el caudal de permeado que como hemos visto es de 5,5 L/h y que como máximo se podría operar 24h al día tendremos un caudal total diario de 132 L/h. Hemos buscado un tanque de almacenamiento para el permeado con un volumen algo mayor. El tanque de almacenamiento siempre lleno modelo FCG con puerta presenta las siguientes características:

Dotaciones de serie:

- Puerta redonda Ø 300 mm
- Kit neumático
- Flotador neumático
- Válvula de presión de vacío de plástico
- 2 válvulas de bola inox 1"
- 3 patas soldadas
- Fondo cónico
- Regleta nivel con protección inoxidable.

Capacidad: 300 L

Diámetro: 620 mm

Altura: 1410 mm



Figura 5.14-Tanque de almacenamiento (Magusa, 2017)

Módulo de membranas:

Material utilizado para las membranas: compuestas de POMS (polioctilmetsiloxano) soportada en PEI (polieterimida) con una selectividad de los poros de $0,7 \mu\text{m}$ y un área total de 40 m^2 de área efectiva.



Figura 5.15- Membranas de POMS del fabricante GMT

El módulo de membranas en un sistema de pervaporación es el componente central que permite la separación selectiva de compuestos volátiles de una corriente líquida. Su diseño y operación adecuados son vitales para lograr una separación eficiente y obtener los productos deseados.

Los módulos de membrana utilizados son módulos tipo envoltura para separación de gases fabricados por GMT. La envoltura de membrana consta de dos membranas planas termoselladas en sus bordes y separadas por separadores para facilitar el drenaje del permeado, que fluye radialmente hacia el agujero central. La Figura 5.9 proporciona una representación de la envoltura de la membrana. El módulo de membrana se ensambla con 87 envolturas de membrana (con un área útil de 10 m^2) dispuestas en compartimentos de tres envolturas cada una, unidas a un tubo central de permeado con dos salidas abiertas. Esta disposición en compartimentos ayuda a mantener una velocidad de flujo de alimentación casi constante, evitando así la formación de capas límite y minimizando el fenómeno de polarización de concentración. Los compartimentos se organizan en un apilamiento de membranas, que está cerrado dentro del recipiente a presión. El flujo de alimentación atraviesa el módulo, haciendo contacto con ambos lados de la envoltura, y el permeado se libera en el tubo central y se extrae de ambas salidas.

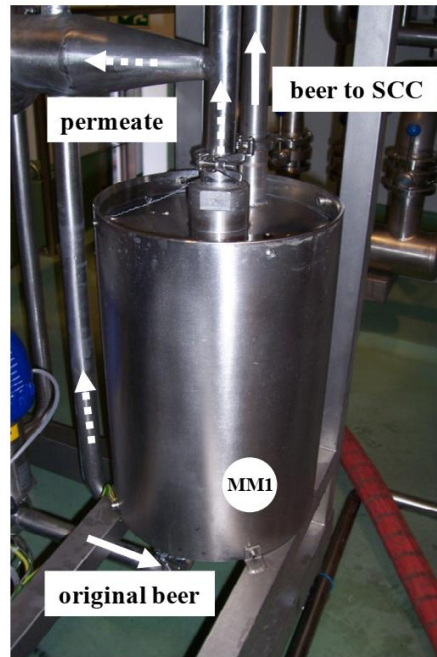


Figura 5.16- Módulo de membrana(Miguel et al., 2010)

Tanto la membrana como el módulo de membranas escogidos para el diseño son del fabricante GMT.

6 CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se ha realizado el estudio y diseño de una planta industrial de recuperación de compuestos aromáticos de la cerveza y su posterior reincorporación a la cerveza desalcoholizada. La adición de estos compuestos aromáticos a la cerveza desalcoholizada enriquece su sabor. Esto aumenta su apreciación y podría usarse para cumplir con los estándares de calidad requeridos por el mercado.

Para la elección del proceso de desalcoholización se han tenido en cuenta dos parámetros: El grado de desalcoholización que es capaz de obtenerse y la pérdida de compuestos aromáticos en el proceso. Si bien es cierto que la columna de conos giratorios no suele ser la opción preferida a nivel industrial debido a la pérdida de volátiles, esto se pretende subsanar mediante la recuperación previa de los aromas. Por tanto, con la columna de conos giratorios se podrá obtener una cerveza con una graduación alcohólica más baja que con cualquier otro método, y con la recuperación de aromas, un producto con una calidad sensorial superior.

Los resultados en la recuperación de compuestos aromáticos han demostrado ser como poco prometedores. Por un lado, la calidad del producto respalda la validez del proceso ya que la mejora sensorial es notable, y la mayoría de los equipos que conforman el sistema son convencionales y fáciles de obtener. En su contraparte, el caudal de cerveza de alimentación es muy superior al caudal de aromas que el equipo de pervaporación es capaz de recuperar. Esto se debe principalmente a la elección del compuesto de las membranas, conforme más afinidad tenga con los compuestos aromáticos mayor será la recuperación de estos. En otras palabras, aunque existe una mejora de la calidad del producto con respecto de una planta que carece de un sistema de pervaporación. Hay que valorar si vale la pena en términos económicos una mejora sensorial, que, aunque es notable sigue estando lejos del producto original.

En definitiva, en este trabajo se pretende sentar precedentes con respecto a la utilización de un sistema con una planta de pervaporación industrial como método de recuperación de aromas, y la posterior desalcoholización de la cerveza mediante una columna de conos giratorios. Se ha demostrado la funcionalidad del proceso a nivel industrial con unos resultados positivos, pero en términos económicos es posible que sean menos viables. Sin duda, la tecnología de la pervaporación sigue avanzando, mejorando y revolucionando el mercado de la cerveza sin alcohol, y en un futuro cercano es probable que la veamos como la opción favorita para obtener cervezas sin alcohol de una calidad superior.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Alberto Gallo García, L., FELIPE TIRADO ARMESTO Ingeniería Ambiental, D., & Acevedo Correa, D. (2015). *Mass transfer during deep fat frying of Arepa con Huevo View project Dropout from higher education: case studies in engineering View project Artículo de Revisión MÉTODOS DE SEPARACIÓN POR PERVAPORACIÓN: UNA REVISIÓN*. <http://revistareciteia.es.tl/>
- Belén, M. M., Tutor, M. M., Químico Bertozzi, I., & Daniel, J. (n.d.). *REVISIÓN DEL PROCESO DE PERVAPORACIÓN*.
- Bompart, M. del V. S. (2008). *PRODUCCIÓN DE CERVEZA SIN ALCOHOL MEDIANTE UN PROCESO DE DIÁLISIS*.
- Börjesson, J., Karlsson, H. O. E., & Trägårdh, G. (1996). Pervaporation of a model apple juice aroma solution: comparison of membrane performance. *Journal of Membrane Science*, 119(2), 229–239. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(96\)00123-8](https://doi.org/10.1016/0376-7388(96)00123-8)
- Brányik, T., Silva, D. P., Baszczyński, M., Lehnert, R., & Almeida E Silva, J. B. (2012). A review of methods of low alcohol and alcohol-free beer production. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 108, Issue 4, pp. 493–506). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.020>
- Brányik, T., Silva, D. P., Baszczyński, M., Lehnert, R., & Almeida e Silva, J. B. (2012). A review of methods of low alcohol and alcohol-free beer production. *Journal of Food Engineering*, 108(4), 493–506. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.020>
- Castro, R. (2010). *Castro, R. (2010)*.
- Catarino, M., Ferreira, A., & Mendes, A. (2009). Study and optimization of aroma recovery from beer by pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 341(1–2), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.05.038>
- Catarino, M., Mendes, A., Madeira, L., & Ferreira, A. (2006). Beer dealcoholization by reverse osmosis. *Desalination*, 200(1–3), 397–399. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.346>
- Catarino, M., Mendes, A., Madeira, L. M., & Ferreira, A. (2007). Alcohol Removal From Beer by Reverse Osmosis. *Separation Science and Technology*, 42(13), 3011–3027. <https://doi.org/10.1080/01496390701560223>
- De Mesones, B. (2009). *PROCESO de ELABORACIÓN BÁSICO y SIMPLIFICADO*. <https://birrapedia.com/img/source/bier/Manual%20de%20elaboracion%20para%20maestros%20cervece ros.pdf>
- Directores, F., Académico, C., Torices, M. F., Daniel, E., & Cirella, G. (2017). *Alumno Daniel Echevarría Villa MEMBRANAS COMPUESTAS CON SELECTIVIDAD MEJORADA PARA LA SEPARACIÓN DE BUTANOL MEDIANTE PERVAPORACIÓN TRABAJO FIN DE MASTER (TFM)*.
- FM GRUPO TECNOLÓGICO. (n.d.). *Intercambiadores de calor de placas*. Retrieved October 13, 2023, from <https://fmgrupotec.com/intercambiadores-de-calor/>
- García, V., Diban, N., Gorri, D., Keiski, R., Uriaga, A., & Ortiz, I. (2008). Separation and concentration of bilberry impact aroma compound from dilute model solution by pervaporation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 83(7), 973–982. <https://doi.org/10.1002/jctb.1902>
- Gresch, 1991. (n.d.).
- John, M., & Hähnlein, W. (2011). Vitamins, 2. Vitamin A (Retinoids). In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley. https://doi.org/10.1002/14356007.o27_o05
- Kaddour Djebbar, M., Nguyen, Q. T., Clément, R., & Germain, Y. (1998). Pervaporation of aqueous ester

- solutions through hydrophobic poly(ether-block-amide) copolymer membranes. *Journal of Membrane Science*, 146(1), 125–133. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00090-8)
- Karlsson, H. O. E., & Trägårdh, G. (1997). Aroma recovery during beverage processing. *Journal of Food Engineering*, 34(2), 159–178. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00081-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00081-2)
- Kunze, W. (2006). *Tecnología para cerveceros y malteros* (H.-J. Manger, Ed.) [Book]. VLB Berlin.
- Lin, L., Zhang, Y., & Kong, Y. (2009). Recent advances in sulfur removal from gasoline by pervaporation. *Fuel*, 88(10), 1799–1809. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.031>
- Lipnizki, F., Olsson, J., & Trägårdh, G. (2002). Scale-up of pervaporation for the recovery of natural aroma compounds in the food industry. Part 1: simulation and performance. *Journal of Food Engineering*, 54(3), 183–195. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00200-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00200-X)
- Lurueña, M. A. (2012). *fabricación de la cerveza sin alcohol*. .
- Magusa, M. V. S. L. (2017). *2017_magusa_cerveza*.
- McKelvy, M. L. (2000). Infrared Spectroscopy: Introduction. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a5601>
- Mehta, G. D. (1982). COMPARISON OF MEMBRANE PROCESSES WITH DISTILLATION FOR ALCOHOL/WATER SEPARATION. In *Journal of Membrane Science* (Vol. 12).
- Miguel, A., Mendes, M., Miguel, L., Madeira, P., Augusto, A., & Ferreira, M. (2010). *Margarida Dias Catarino PRODUCTION OF NON-ALCOHOLIC BEER WITH REINCORPORATION OF ORIGINAL AROMA*.
- Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. (2022). *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. <https://doi.org/003230533>
- Montanari, L., Marconi, O., Mayer, H., & Fantozzi, P. (2009). Production of Alcohol-Free Beer. In *Beer in Health and Disease Prevention* (pp. 61–75). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373891-2.00006-7>
- Moreira da Silva, P. , D. W. B. (2008). *Spinning cone column distillation – innovative technology for beer dealcoholisation*. *Cerevisia* 33 (2), 91–95. 91–95.
- Pereira, C. C., Rufino, J. R. M., Habert, A. C., Nobrega, R., Cabral, L. M. C., & Borges, C. P. (2005). Aroma compounds recovery of tropical fruit juice by pervaporation: membrane material selection and process evaluation. *Journal of Food Engineering*, 66(1), 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.037>
- Pilipovik, M. V., & Riverol, C. (2005). Assessing dealcoholization systems based on reverse osmosis. *Journal of Food Engineering*, 69(4), 437–441. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.08.035>
- Polsinelli. (2023). Polsinelli. *Polsinelli*. https://www.polsinelli.it/es/electrobomba-enos-20-P1941.htm?mid=1860&gclid=Cj0KCQjw1aOpBhCOARIsACXYv-emQxhy4yLkLUiOPRxD1uXlnUi78Z6MInLcuJ89Z9R52MdfP5HC-RwaArpdEALw_wcB
- RETECNO S.L. (2023). *Intercambiadores-Tubulares-RETNT0*.
- Sampranpiboon, P., Jiratananon, R., Uttapap, D., Feng, X., & Huang, R. Y. M. (2000). Pervaporation separation of ethyl butyrate and isopropanol with polyether block amide (PEBA) membranes. *Journal of Membrane Science*, 173(1), 53–59. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)00351-3](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)00351-3)
- Shepherd, A., Habert, A. C., & Borges, C. P. (2002). Hollow fibre modules for orange juice aroma recovery using pervaporation. *Desalination*, 148(1–3), 111–114. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00662-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00662-8)
- Tan, S., Li, L., Xiao, Z., Wu, Y., & Zhang, Z. (2005). Pervaporation of alcoholic beverages—the coupling effects between ethanol and aroma compounds. *Journal of Membrane Science*, 264(1–2), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.04.028>
- Trifunovic, O., & Trägårdh, G. (2002). Transport of diluted volatile organic compounds through pervaporation membranes. *Desalination*, 149(1–3), 1–2. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00682-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00682-3)
- Urriaga, A., Gorri, D., & Ortiz, I. (2002). Mass-Transfer modeling in the pervaporation of VOCs from diluted solutions. *AIChE Journal*, 48(3), 572–581. <https://doi.org/10.1002/aic.690480314>

- Urtiaga, A. M., Gorri, E. D., Gómez, P., Casado, C., Ibáñez, R., & Ortiz, I. (2007). Pervaporation technology for the dehydration of solvents and raw materials in the process industry. *Drying Technology*, 25(11), 1819–1828. <https://doi.org/10.1080/07373930701677975>