

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

Estudio de alternativas de reutilización del bagazo producido en la industria cervecera

Autora: Melody Pacheco Espejo

Tutores: Mónica Rodríguez Galán

Fernando Vidal Barrero

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

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Estudio de alternativas de reutilización del bagazo producido en la industria cervecera

Autora:

Melody Pacheco Espejo

Tutores:

Mónica Rodríguez Galán

Fernando Vidal Barrero

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado: Estudio de alternativas de reutilización del bagazo producido en la industria cervecera

Autora: Melody Pacheco Espejo

Tutores: Mónica Rodríguez Galán

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos

A mis maestros

Resumen

A nivel mundial la industria de la cerveza se considera una de las agroindustrias más importantes mundialmente. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, se producen 114.000.000 kilogramos de cervezas al año. En consecuencia, se produce una cantidad incontrolada de residuos sólidos, con la máxima preocupación en el bagazo de malta ya que representa un 85% de los residuos totales que se producen en la industria cervecera.

Existen muchas alternativas para la reutilización de este subproducto generado, destacando su incorporación en otros procesos industriales que mejoren la economía circular.

El objetivo de este proyecto es el estudio de distintas alternativas posibles para su reutilización, concretamente en la producción de biogás y la obtención de compuestos antioxidantes a partir de este. Esto contribuye al desarrollo de sistemas sostenibles en la producción de cervezas.

En primer lugar, se explica brevemente el proceso de producción de cerveza artesana para poder así realizar un balance de materia con el objetivo de conseguir una cantidad de bagazo, el cual va a ser tratado en las distintas alternativas mencionadas anteriormente.

A continuación, se desarrollan ambas alternativas, describiendo detalladamente sus respectivos procesos. Y para finalizar, se ha hecho un estudio de viabilidad económica.

Abstract

Worldwide, the beer industry is considered one of the most important agro-industries in the world. According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations, 114,000,000 kilograms of beers are produced annually. Consequently, an uncontrolled amount of solid waste is produced, with the utmost concern in malt bagasse as it accounts for 85% of the total waste produced in the brewing industry.

There are many alternatives for the reuse of this generated by-product, highlighting its incorporation into other industrial processes that improve the circular economy.

The objective of this project is the study of different possible alternatives for its reuse, specifically in the production of biogas and the obtaining of antioxidant compounds from it. This contributes to the development of sustainable systems in beer production.

First, the production process of craft beer is briefly explained in order to make a balance of matter with the aim of achieving a quantity of bagasse, which will be treated in the different alternatives mentioned above.

Both alternatives are then developed, describing in detail their respective processes. And finally, an economic feasibility study has been carried out.

Índice

Resumen	vii
Abstract	viii
Índice	x
Índice de Tablas	xii
Índice de Figuras	xiii
1 Introducción de la industria cervecera	1
1.1 Bagazo	1
1.1.1 Composición del bagazo	1
1.1.2 Aplicación del bagazo	2
2 Descripción del proceso de fabricación de cerveza	11
2.1 Descripción global del proceso.....	11
2.2 Descripción cualitativa del proceso	12
2.2.1 Materias primas	12
2.2.1.1 Cereales cerveceros.....	12
2.2.1.1.1 Cebada.....	12
2.2.1.1.2 Trigo	13
2.2.1.2 Agua	13
2.2.1.3 Lúpulo	13
2.2.1.4 Levadura	14
2.3 Elaboración del mosto cervecero.....	15
2.3.1 Malteado	15
2.3.1.1 Remojo	15
2.3.1.2 Germinación.....	15
2.3.1.3 Secado y tostado.....	16
2.3.2 Obtención del mosto dulce.....	16
2.3.2.1 Molienda	16
2.3.2.2 Maceración.....	17
2.3.2.3 Filtración y lavado	17
2.3.2.4 Cocción	17
2.3.2.5 Clarificación del mosto	17
2.3.2.6 Enfriamiento	17
2.3.3 Elaboración de la cerveza.....	18
2.3.3.1 Fermentación.....	18
2.3.3.2 Maduración	18
2.3.3.3 Envasado	18
2.3.4 Diagrama de flujo	19

3	Alternativas de uso del bagazo producido	20
3.1	<i>Posibles alternativas de uso del bagazo cervecero</i>	<i>20</i>
3.1.1	Fraccionamiento del bagazo	20
3.1.2	Insumo del bagazo cervecero en la elaboración de una barra de cereales alta en fibra	21
3.1.3	Bagazo de cerveza utilizado en la alimentación del ganado	22
3.2	<i>Generación de biogás a partir de subproductos y efluentes líquidos mediante digestión anaerobia.</i>	<i>23</i>
3.2.1	Digestión anaerobia.....	23
3.2.2	Condiciones y parámetros operacionales.....	25
3.2.3	Digestión anaerobia del bagazo	28
3.2.4	Tecnologías de digestión anaerobia	29
3.2.4.1	Pretratamiento	29
3.2.4.2	Tratamiento primario	30
3.2.4.3	Tratamiento secundario.....	32
3.2.4.4	Elección de las alternativas	35
3.3	<i>Obtención de compuestos antioxidantes a partir del bagazo cervecero.....</i>	<i>37</i>
3.3.1	Compuestos antioxidantes	37
3.3.1.1	Tipos.....	38
3.3.1.2	Compuestos fenólicos presentes en el bagazo cervecero.....	38
3.3.1.3	Proceso de obtención de los compuestos fenólicos antioxidantes del bagazo cervecero ..	39
3.3.1.4	Selección de alternativas.....	40
3.3.1.5	Selección del proceso	46
3.3.1.6	Descripción del proceso. Diagrama de bloques	47
4	Balance de materia	49
5	Viabilidad económica.....	51
5.1	<i>Obtención de biogás a partir de bagazo cervecero.....</i>	<i>51</i>
5.2	<i>Obtención de compuestos fenólicos a partir de bagazo cervecero.....</i>	<i>54</i>
	Referencias	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros y condiciones operacionales	26
Tabla 2. Rango de temperaturas	27
Tabla 3. Clasificación compuestos fenólicos [13]	38
Tabla 4. Coste de los equipos principales	52
Tabla 5. Coste total de inversión	53
Tabla 6. Costes asociados a la producción	54
Tabla 7. Coste equipos principales	54
Tabla 8. Coste total de inversión	55
Tabla 9. Coste total de producción	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Composición de bagazo	2
Ilustración 2. Diagrama de bloques del proceso	12
Ilustración 3. Cebada	13
Ilustración 4. Trigo	13
Ilustración 5. Lúpulo	14
Ilustración 6. Ale y Lager	14
Ilustración 7. Diagrama de flujo	19
Ilustración 8. Rutas metabólicas del proceso de digestión anaerobia	24
Ilustración 9. Filtro de banda a presión	31
Ilustración 10. Filtro prensa	31
Ilustración 11. Tornillo prensa horizontal	32
Ilustración 12. Digestor del sistema Valorga	32
Ilustración 13. Digestor del sistema Kompogas	33
Ilustración 14. Digestor sistema Dranco	33
Ilustración 15. Reactor UASB	34
Ilustración 16. Reactor EGSB	35
Ilustración 17. Digestión anaerobia	36
Ilustración 18. Grupo fenol	37
Ilustración 19. Deslocalización electrónica	37
Ilustración 20. Ácido p-cumárico	38
Ilustración 21. Ácido ferúlico	38
Ilustración 22. Ácido cafeico	38
Ilustración 23. Ácido gálico	38
Ilustración 24. Catequina	39
Ilustración 25. Ácido sinapico	39
Ilustración 26. Quercetina	39
Ilustración 27. Extracción Soxhlet	42
Ilustración 28. Extracción asistida por microondas	42
Ilustración 29. Extracción asistida por ultrasonido	43
Ilustración 30. Planta para la obtención de compuestos fenólicos antioxidantes	48

1 INTRODUCCIÓN DE LA INDUSTRIA CERVECERA

Actualmente, una de las mayores preocupaciones de la humanidad es la gran cantidad de contaminantes que se vierten al agua y al medio ambiente. En la industria de alimentos y de bebidas donde se usa una amplia gama de materias primas y tecnologías se generan residuos que engloban tanto desechos líquidos como residuos sólidos. Estos pueden variar según las tecnologías usadas, la escala de producción, los tipos de ingredientes, etc.

Es la industria la que debe trabajar para reducir la generación de residuos, lo que se traduce en un menor impacto ambiental y un menor consumo de recursos materiales.

Un claro ejemplo es la industria cervecera que abarca desde cervecerías multinacionales que exportan sus productos a numerosos países hasta pequeñas microcervecerías que se enfocan en la producción y distribución local.

La cerveza es una bebida alcohólica producto de la fermentación que produce la levadura por el almidón que posee la cebada u otros cereales germinados que se pueden utilizar también en esta industria, como es el trigo, todo esto en una mezcla con agua.

Por cebada se conoce al cereal, similar al trigo, que se emplea en la elaboración de la cerveza. El lúpulo es una planta que se utiliza en el proceso de elaboración de cerveza, el cual da cualidades de aroma, sabor y además ayuda a la conservación de la cerveza. Y la levadura, que es otra de las materias primas, se emplea en el proceso, es un hongo unicelular que actúa sobre el azúcar para producir alcohol y dióxido de carbono.

La industria incluye a productores agrícolas que se encargan de cultivar los cereales necesarios para la producción de cerveza, como la cebada, el maíz, el lúpulo; incluye también las instalaciones donde se produce dicha cerveza, a los transportistas que manejan tanto el producto final como sus materias primas. Y, por último, también hace referencia a los representantes que se encargan de su comercialización y venta de la cerveza al público.

1.1 Bagazo

En la industria de la cerveza el residuo sólido que se obtiene principalmente es el bagazo (BSG). Representa alrededor del 85% de los subproductos totales que se generan en la obtención de cerveza [1]. Es un residuo que se obtiene en una de las primeras etapas de la producción de cerveza, concretamente en la posterior a la obtención del mosto cervecero. Se trata de un residuo que presenta un importante potencial de valorización debido a que tiene una composición rica en proteínas, carbohidratos y compuestos fenólicos, entre otros. Esto hace que tenga distintas alternativas de uso, los cuales se estudiarán a lo largo del proyecto.

1.1.1 Composición del bagazo

Se obtienen aproximadamente 20 kg de bagazo por 100 litros de cerveza fabricada, por lo que se obtienen grandes volúmenes a bajo coste anualmente [1].

El bagazo es un material lignocelulósico compuesto principalmente por proteínas y fibras, aunque también contiene en menor cantidad lípidos y minerales. En el siguiente gráfico circular se puede ver con claridad:

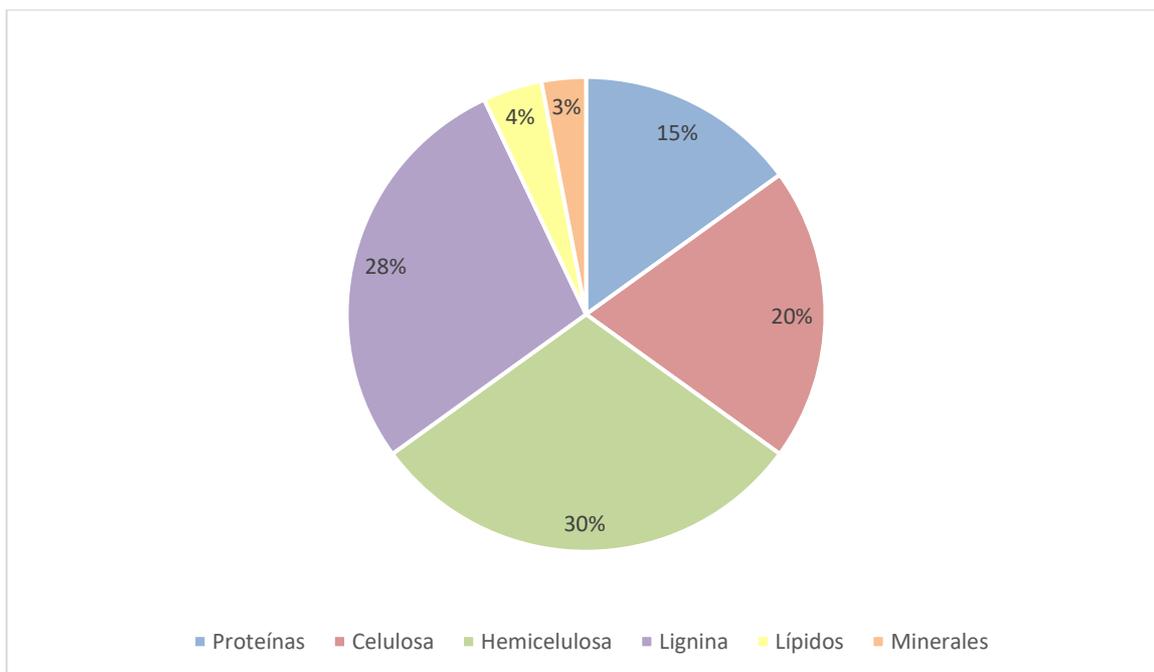


Ilustración 1. Composición de bagazo

Por lo tanto, como se observa en la gráfica, el bagazo puede estar compuesto de un 15 – 26% de proteínas y un 70% de fibras. Estas fibras incluyen celulosa (15,5 – 25%), hemicelulosa (28 – 35%) y lignina (28%). También pueden contener lípidos, que componen entre un 3,9 y 18% de los cuáles pueden ser triglicéridos. Pueden contener también en pequeña proporción minerales, tales como calcio, fósforo y selenio, además de compuestos fenólicos [2].

Las cantidades indicadas pueden variar en función de la variedad y calidad de la cebada utilizada y de las condiciones en las que se den las etapas de malteado y macerado.

1.1.2 Aplicación del bagazo

Debido a dicha composición, el bagazo puede ser utilizado en diversos procesos, incluso se puede utilizar para la obtención de energía. Algunas de las alternativas pueden ser las siguientes, que se ven con mayor profundidad a lo largo del proyecto:

- Alimento para animales
- Procesos biotecnológicos
- Producción de biocombustibles
- Obtención de productos de alto valor añadido
- Dietas humanas

2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE CERVEZA

2.1 Descripción global del proceso

El proceso de la industria cervecera abarca desde la dosificación del lúpulo y de la malta que se emplean, que pueden ser varios, aunque la malta más utilizada es de cebada, hasta el envasado y empaquetado final del producto, incluyendo el tratamiento de agua que se necesita para llevar este a cabo. Las materias primas utilizadas son la malta, agua de proceso tanto de maceración como de cocción, levadura y lúpulo. Dependiendo del tipo de cerveza también se pueden utilizar adjuntos, que son materias primas que sustituyen parcialmente a la malta, pueden ser, por ejemplo: trigo, arroz, maíz, avena... El proceso consta de una serie de etapas, descritas con brevedad a continuación [3].

En primer lugar, se da la recepción del cereal que se va a emplear para el proceso, que se almacenará en silos. Ésta sufre el proceso de malteado, que consta de remojo, germinación y secado al horno. Con el malteado se consigue la generación de enzimas para su posterior maceración. Una vez haya finalizado el proceso de malteado, los granos se trituran, dando lugar a una especie de harina. La harina obtenida pasa a una etapa de macerado, que se lleva a cabo con el empleo de agua. En esta etapa de maceración se genera tanto el mosto cervecero, que junto al lúpulo pasan a la etapa de cocción, como un subproducto denominado bagazo. El bagazo tiene mucho valor, por lo que tiene muchas alternativas de uso, las cuales se estudiarán a lo largo del proyecto. El mosto se clarifica en una cuba, conocida como remolino o Whirpool, enfriándose después hasta la temperatura de inoculación de la levadura para poder llevarlo a la etapa de fermentación. En esta etapa, la levadura es la encargada de transformar los azúcares fermentables en alcohol y CO₂. A continuación, la cerveza resultante de la fermentación, conocida por cerveza verde, pasa a la etapa de maduración, que son aproximadamente dos semanas. Antes de que el producto final sea embotellado y etiquetado, la cerveza pasa la etapa de filtrado, para poder eliminar los restos de levadura que no han reaccionado. Por último, las botellas etiquetadas se empaquetan y paletizan para su posterior distribución [3].

A continuación, se representa un diagrama de bloques en el que se recogen todas las etapas del proceso de producción de cerveza anteriormente explicado:

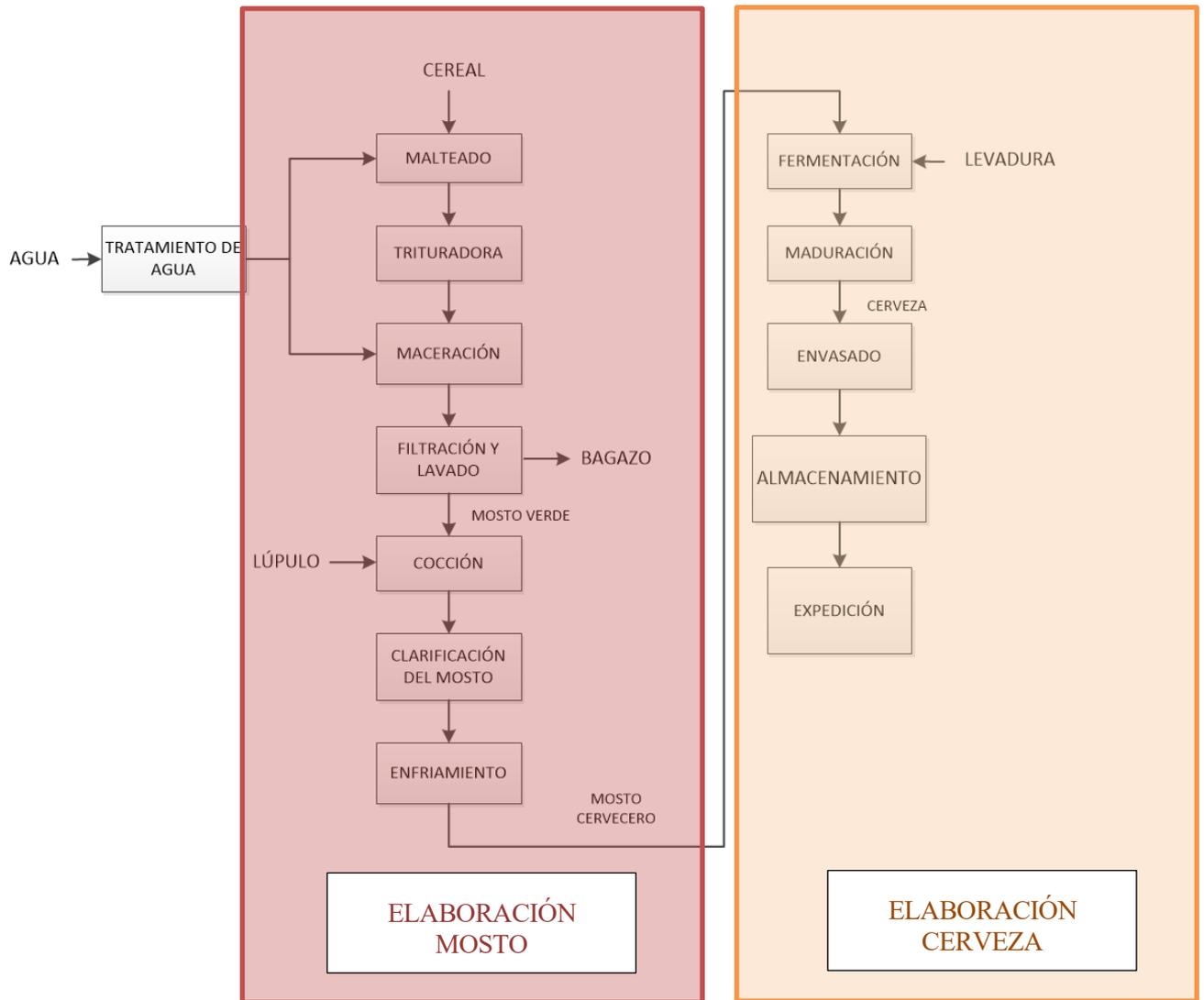


Ilustración 2. Diagrama de bloques del proceso

2.2 Descripción cualitativa del proceso

2.2.1 Materias primas

2.2.1.1 Cereales cerveceros

2.2.1.1.1 Cebada

La cebada es el cereal más utilizado en el proceso de fabricación de cerveza ya que reúne las características idóneas para la elaboración de esta, su cultivo es sencillo y se adapta a los distintos tipos de clima. Otro motivo por el que más se utiliza es por su gran contenido en almidón, que es la sustancia que da origen al extracto fermentable. Además, poseen un contenido en proteínas suficiente para el correcto desarrollo de la levadura; también contienen sustancias nitrogenadas, que son las causantes de la formación de espuma. Le da un sabor suave y dulce a la cerveza [3].

Hay numerosas variedades de cebada. La cebada de dos carreras, o también conocida como cebada cervecera, es el tipo de cebada que más se utiliza porque sus granos son mayores y presentan una uniformidad en su tamaño. Estos granos deben de absorber bien el agua y deben de germinar rápido y uniformemente para optimizar la etapa de malteado y conseguir la mayor cantidad de malta posible. El grano de cebada presenta cascarilla [3].



Ilustración 3. Cebada

2.2.1.1.2 Trigo

El trigo es un cereal cervecero que se utiliza como adjunto en la industria de la cerveza o directamente como ingrediente principal ya que tiene un elevado poder diastático, es decir, es capaz de convertir fácilmente el almidón en azúcares. Como adjunto se conoce a las materias primas que sustituyen parcialmente a la malta de cebada con el objetivo de aumentar el contenido de almidón y por lo tanto el porcentaje de azúcares fermentables. Le da un sabor agrio a la cerveza [4].

El contenido en proteínas del trigo es más elevado que el que presenta la cebada. Sus granos no contienen cascarilla, lo cual va a diferir en el subproducto que se genera con respecto al subproducto obtenido utilizando la cebada, que se explica más adelante [4].



Ilustración 4. Trigo

2.2.1.2 Agua

La cerveza como producto final consta aproximadamente de un 90%. También es utilizada en algunas de las etapas de fabricación de esta, por lo que se consumen cantidades elevadas [3].

El agua que se utiliza tiene sustancias disueltas, como minerales, que influye en gran medida en la calidad de la cerveza producida, que pueden manifestarse en malos sabores o en aspectos no deseados que afectan en las características de la cerveza. Además, puede contener microorganismos o parásitos que pueden afectar a la salud humana. De esta forma, el agua que se vaya a utilizar debe ser tratada porque al no ser así, las sustancias disueltas pueden afectar tanto en los procesos de producción si se encuentran en grandes cantidades como en la salud de los consumidores finales de este producto.

2.2.1.3 Lúpulo

El lúpulo procede de una planta trepadora que puede alcanzar los ocho metros de longitud. Es de hoja perenne, sus flores son pequeñas y se presentan con una forma parecida a la de una pequeña piña, como se puede observar en la imagen. Esto se debe a que están aglomeradas en inflorescencia, es decir, todas las flores que nacen lo hacen en un mismo tallo [5].

Es una planta dioica, de este modo hay tanto flores femeninas como masculinas, ambas crecen en plantas separadas. Son las flores femeninas sin fecundar las que se utilizan en la industria cervecera [5].

Lo que le proporciona el lúpulo a la cerveza es el aroma y el sabor amargo típico de la cerveza. Además, consigue

darle estabilidad a la espuma y protege a la bebida del crecimiento bacteriano. Además, es un precursor de la actividad de la levadura [3].

Para conservar las características del lúpulo, este debe permanecer a bajas temperatura evitando además el contacto con el aire. Por consiguiente, se suele envasar al vacío en una cámara frigorífica hasta su uso [3].



Ilustración 5. Lúpulo

2.2.1.4 Levadura

La levadura es otra de las materias primas indispensables para la industria cervecera. De ella depende que se produzca la conversión de los azúcares en alcohol en la etapa de fermentación [3].

Se tratan de hongos unicelulares que se reproducen por división celular. Existen muchas especies.

Estas se pueden clasificar según el tipo fermentación que se produce:

- Levadura de alta fermentación, conocidas para la cerveza tipo ale. Se distingue porque puede fermentar a altas temperaturas, entre 15-25°C. Con este tipo de levadura se forman grumos en la superficie del tanque de fermentación [6].
- Levadura de baja fermentación, conocidas para la cerveza tipo lager. Esta se caracteriza por fermentar a temperaturas bajas, correspondientes entre 5 y 15°C. Se depositan en el fondo del tanque de fermentación [6].

Las materias primas se seleccionan con el criterio de poder maximizar la eficiencia de producción de nuestra cerveza, teniendo siempre en cuenta los equipos de los que se disponen, intentando obtener la mejor calidad de nuestro producto. Por ese motivo, la levadura elegida debe ser de alta calidad. Los expertos en la producción de cerveza buscan una alta velocidad de fermentación, una buena conversión de los azucares en alcohol (etanol) entre otras cosas.

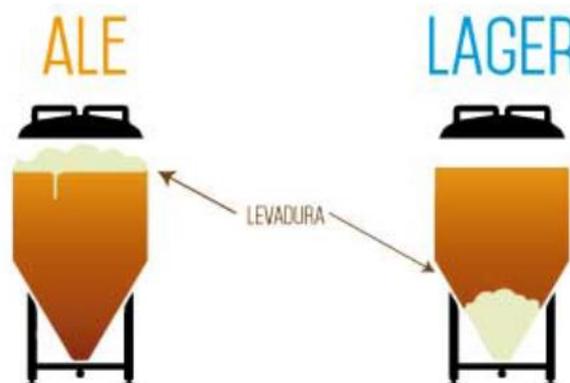


Ilustración 6. Ale y Lager

Una vez conocidas las materias primas que se van a utilizar para la elaboración de la cerveza, se procede a la descripción detallada de cada una de las etapas que componen el proceso de producción de esta.

El proceso se va a dividir en dos grandes bloques, en primer lugar, se va a describir el proceso por el cual se obtiene el mosto cervecero, que incluye numerosas etapas. En segundo lugar, se va a explicar el bloque donde se obtiene la cerveza a partir de dicho mosto cervecero.

2.3 Elaboración del mosto cervecero

2.3.1 Malteado

El malteado es el proceso por el cual se obtiene la malta. Después del agua, el segundo ingrediente que se utiliza en mayor cantidad es la malta, que es el grano de los diversos cereales cerveceros que existen y que se pueden utilizar para la producción de cerveza, que han sufrido el proceso de malteado. El objetivo principal de esta etapa es la conversión del almidón en azúcares a partir de una serie de enzimas. Con los diferentes tipos de cereales que se pueden utilizar se pueden llegar a conseguir numerosos sabores, colores, aromas y olores [3].

Por lo tanto, la etapa de malteado de los granos cerveceros es imprescindible para la producción de la cerveza. Para conseguir una eficiencia adecuada de esta etapa, los granos deben ser escogidos adecuadamente. Las características que deben presentar estos granos son: alto contenido en almidón, el tamaño de estos debe ser uniforme y poseer un alto poder diastático [3].

Los granos antes de sufrir el proceso de malteado deben ser lavados para eliminar posibles restos de arena.

Esta etapa se compone de tres fases: remojo, germinación y tostado.

2.3.1.1 Remojo

En esta fase, los granos se depositan en un tanque y se cubren con agua a 15°C. Con esto se consigue que los granos aumenten su contenido en agua, un 40-45% aproximadamente, necesario para la fase de germinación. Este proceso oscila entre 24 y 35 horas de duración, y el agua que no ha sido absorbida en este tiempo, se drena [3].

Los tanques se airean para evitar que el embrión se ahogue. Además, contienen una especie de rastrillos que hacen que el agua se mantenga uniforme por todo el tanque. Tienen también un falso fondo que es por donde se inyecta el aire.

El tiempo en el que el cereal se rehúmedece depende por lo tanto de la calidad del grano, de su tamaño y de la temperatura a la que se encuentre el agua.

2.3.1.2 Germinación

En esta fase de germinación la planta crece de forma natural, lo que posibilita que su actividad metabólica produzca las enzimas necesarias para la degradación de los azúcares. A lo largo de la germinación, las enzimas descomponen las proteínas y el almidón de los granos [3].

Se lleva a cabo en tanques conocidos como germinadores, que al igual que en los tanques de remojo, constan de un falso fondo para inyectar aire húmedo, lo cual permite proporcionar oxígeno a los embriones y eliminar el dióxido de carbono que se ha podido generar.

Esta etapa tiene una duración de aproximadamente 5 días.

El almidón es el tipo de carbohidrato más común en los granos, y a su vez, más importante para la elaboración de la cerveza. Existen dos formas, la amilosa y la amilopectina. Ambas son polímeros de la glucosa [3].

2.3.1.3 Secado y tostado

Cuando los granos de malta se secan es cuando se detiene la etapa de germinación. Esto se consigue con un flujo de aire caliente, el cual eleva la presión de vapor de la malta, evaporando así el agua. Esto se consigue con un rango de temperatura del aire de entrada, ya que al comienzo del proceso el secado será más rápido porque el agua está retenida en la pared de la malta, y después se irá ralentizando ya que hay que eliminar el agua que se encuentra en el interior de la malta, por lo que se necesita una mayor temperatura del aire. Este proceso se da por finalizado cuando el contenido en humedad de la malta esté entre 3 y 5% aproximadamente [3].

En esta fase podemos elegir el tipo de cerveza que queremos producir, ya que si el contenido en humedad es del 4-5% se obtiene una cerveza tipo lager o de baja fermentación. Sin embargo, si se consigue una humedad que oscila entre el 2 y 3%, se obtiene una cerveza ale o de alta fermentación [3].

A veces también se opta por el proceso de tostado para la eliminación del agua. Aquí se consigue una malta más oscura que será característico para ciertos tipos de cerveza. Además, se consigue un sabor más amargo del producto final.

2.3.2 Obtención del mosto dulce

La siguiente etapa es la producción del mosto dulce para su posterior fermentación. El mosto cervecero se define según la norma de calidad de la cerveza y de las bebidas de malta publicada en el Real Decreto 678/2016, 16 de diciembre como: “producto obtenido a partir de la malta molida o sus extractos, mediante un proceso de extracción acuosa por sacarificación enzimática” [7].

Las fases que tiene esta etapa son la molienda del grano, la maceración, filtración y agotamiento del bagazo, su posterior cocción y clarificación y finalmente una refrigeración.

2.3.2.1 Molienda

Esta fase tiene como objetivo la trituración de la malta con el fin de reducir el endospermo, que es el tejido nutricional formado en el saco embrionario de las plantas con semilla, para poder liberar el extracto [8].

Lo que se pretende conseguir es que la cascarilla permanezca íntegra para que pueda hacer de lecho filtrante en la posterior fase de clarificación. Aunque esto solo ocurre en los cereales que contengan cascarilla como es en el caso de la cebada. Además, cuando la malta es demasiado triturada puede provocar sabores indeseados [3].

Para conservar mejor la malta y que se degrade en menor medida, la molienda se llevará a cabo en el momento que se vaya a hacer la fase de maceración. De esta forma, el grano se mantiene intacto hasta entonces almacenada en silos.

Este proceso se puede conseguir en seco y en húmedo. Si se hace por vía húmeda, se puede ablandar la cascarilla y evitar que se formen harinas en exceso [3].

Además, existen dos técnicas en la molienda: la trituración y la molturación. El uso de una técnica u otra va a depender de la granulometría del producto que se pretenda obtener. Si se obtiene una granulometría más fina, más fácil será la mezcla de la malta con el agua. Sin embargo, si la granulometría es menos fina, ocurrirá todo lo contrario, y de este modo las cáscaras podrán utilizarse como filtro en las posteriores etapas de filtrado y lavado [3].

La diferencia de las dos técnicas mencionadas anteriormente es que en la molturación se consigue un aplastamiento de los granos, de manera que se conserva mejor la cascara. Para esta técnica se utilizan los molinos de rodillos. En la técnica de trituración, se consiguen partículas más pequeñas, por lo que se utilizan molinos de impacto.

2.3.2.2 Maceración

En esta etapa se mezcla la malta molida y el agua. El agua empleada en el proceso debe ser agua de consumo humano. Para ello, se realizan diferentes tratamientos mecánicos, físicos y químicos para conseguir que tenga una calidad y unas propiedades determinadas.

Hay que regular la temperatura de maceración, ya que la malta libera enzimas que se activan a diferentes temperaturas y para que estas puedan realizar su actividad adecuadamente [3].

El producto de esta etapa es un extracto soluble.

2.3.2.3 Filtración y lavado

Esta etapa tiene como objetivo obtener una disolución con un contenido en compuestos solubles lo más alto posible.

El líquido que se obtiene en la etapa de maceración contiene sólidos en suspensión, que son los sólidos que no se han podido mezclar con el agua añadida. Con la filtración se pretende separar estos restos sólidos que no han sido mezclados.

Las cáscaras de la malta de cebada quedan retenidas formando un filtro natural, denominado bagazo. El bagazo tiene muchas alternativas de reutilización, ya que es un residuo rico en fibras y proteínas. Las posibles alternativas de reutilización se detallan con posterioridad. Las cervezas de trigo no se hacen con un 100% de malta de trigo, sino que se mezcla con cebada, por lo que quedaría un 70% de malta de trigo y un 30% de malta de cebada aproximadamente. De este modo, la cantidad que se obtiene de bagazo es menor con respecto a la que se obtiene con una malta de cebada pura, ya que como se ha comentado anteriormente, los granos de trigo no tienen cáscara. El líquido se pasa varias veces por este filtro natural ya que se pretende conseguir un líquido más limpio y transparente. Este líquido limpio se le denomina primer mosto. El grado de limpieza se valora con un indicador llamado NTU (Nephelometric Turbidity Unit) [3].

Cuando ya se ha obtenido el primer mosto, este pasa a una fase de lavado que se lleva a cabo añadiendo agua caliente, a unos 80°C aproximadamente, sobre los restos de sólido del filtro natural con el fin de arrastrar la mayor cantidad de compuestos solubles atrapados. Este proceso también se le conoce como agotamiento del bagazo. De aquí se obtiene el denominado mosto verde.

Para esta etapa se puede utilizar tanto cubas filtro como filtros de prensa.

2.3.2.4 Cocción

Tras el filtrado y lavado del mosto, este se lleva a una caldera para cocerlo. Esto se hace para detener la actividad enzimática [3]. Además, en esta etapa se añade el lúpulo, que es el encargado de aportar aroma y amargor a la cerveza. En función de la cantidad de lúpulo que se añada, tendrá mayor o menor amargor.

El proceso tiene un rango de duración de una o dos horas.

2.3.2.5 Clarificación del mosto

Tras someter el mosto a elevadas temperaturas y añadirle el lúpulo, es necesario volver a filtrar el mosto para eliminar los restos de lúpulo. Este filtrado se realiza en un tanque denominado Whirlpool, que lleva al mosto a un movimiento centrífugo, concentrando en el centro de este las partículas más gruesas que acaban precipitando en el fondo del recipiente, y enviando a la zona externa el mosto clarificado [3].

Cabe destacar que los restos de lúpulo se forman cuando el lúpulo es utilizado en forma de pellets o flores y no cuando se utiliza un extracto de lúpulo.

2.3.2.6 Enfriamiento

El mosto que se extrae del Whirlpool sigue caliente, por lo que se enfría con el objetivo de evitar la proliferación de bacterias. Esto se consigue con un intercambiador de placas, aunque también se pueden utilizar de otro tipo.

Para las cervezas de fermentación alta se debe enfriar hasta 20°C mientras que, para las cervezas de fermentación baja, se enfría hasta 10°C aproximadamente [3].

Es importante airear el mosto durante esta fase, ya que las levaduras van a necesitar oxígeno para poder dar comienzo a su actividad metabólica en la posterior etapa de fermentación.

2.3.3 Elaboración de la cerveza

En la elaboración de la cerveza intervienen una serie de procesos por medio de los cuales se da la transformación del mosto en cerveza.

La cerveza se define según la norma de calidad de la cerveza y de las bebidas de malta publicada en el Real Decreto 678/2016, 16 de diciembre como: “alimento resultante de la fermentación, mediante levaduras seleccionadas, de un mosto cervecero elaborado a partir de materias primas naturales” [7].

Las fases que constan esta etapa son la fermentación, la maduración y envasado.

2.3.3.1 Fermentación

Es la etapa por la cual la cerveza obtiene el alcohol. Para acelerar el proceso, el mosto se pasa por un intercambiador de calor.

Es aquí donde se añade la levadura, que se alimenta del azúcar del mosto, liberando alcohol y dióxido de carbono [3].

Se trata de un proceso exotérmico por lo que las cubas deben estar refrigeradas para mantener la temperatura adecuada y evitar incidentes.

Dependiendo del tipo de cerveza que se quiera obtener, se empleará un tipo de levadura distinto:

- Levadura de alta fermentación: es la levadura empleada en la fabricación de cervezas tipo Ale. Son levaduras que se activan a altas temperaturas (18-25°C) y el periodo de fermentación suele durar entre 5 y 7 días.
- Levadura de baja fermentación: se emplea para la fabricación de cervezas tipo Lager. Estas se activan a bajas temperaturas (7-9°C) y el periodo de fermentación dura hasta dos semanas.

2.3.3.2 Maduración

Es la etapa donde se deja reposar la cerveza tras su fermentación. Tiene una duración de entre dos semanas y cuatro meses. A lo largo de esta etapa la cerveza logra sus matices diferenciadores [3].

Su posterior etapa sería el envasado, aunque antes se pasa por otro proceso de filtración para poder eliminar los grumos de levadura que no han reaccionado y partículas que se encuentran en suspensión. Esta filtración se debe hacer en condiciones constantes para no alterar las características que presenta la cerveza elaborada.

2.3.3.3 Envasado

Una vez que la cerveza ha pasado por la etapa de maduración, ya está lista para ser envasada en su recipiente final para así poder ser comercializado.

3 ALTERNATIVAS DE USO DEL BAGAZO PRODUCIDO

La búsqueda de alternativas que permitan progresar en la gestión de la economía circular en el proceso de producción de cerveza es un reto para la mayoría de las compañías cerveceras, con el objetivo de poder reducir, reutilizar o reciclar los residuos que se generan en la industria cervecera.

El aprovechamiento de los residuos orgánicos, como es en este caso el bagazo, para agregarlo como materia prima en otros procesos productivos es uno de los aspectos que se trabaja de cara a su optimización.

Al bagazo, como se ha mencionado anteriormente, se le conoce como la cascarilla que se desprende tras el proceso de cocción y filtrado de la malta. El mosto se utiliza como materia prima para la elaboración de la cerveza, mientras que los restos de malta dan lugar a una pasta húmeda, componente con un elevado contenido proteico y de fibra que se destina principalmente a la alimentación animal, aunque hoy día se estudian distintos procesos para la reutilización de este bagazo.

En primer lugar, el bagazo podría ser aprovechado como suplemento animal debido a su alto valor proteico [9].

Otra manera de utilizar el bagazo de cerveza es en la elaboración de sustrato para la cubierta de azoteas y jardineras. Aunque esto no es todo, ya que juega un papel importante en el consumo humano utilizándose como ingrediente de comida como por ejemplo el pan. Esto se debe por su riqueza en vitamina B, sales minerales y aminoácidos. Además, puede utilizarse en industrias cosméticas y farmacéuticas por la actividad antioxidante que lo caracteriza [10].

Con el objetivo de minimizar el impacto ambiental se sigue estudiando e investigando para continuar dándole diversos usos al bagazo. Estudios plantean la posibilidad de hacer uso del bagazo como sustituto de la harina de pescado, por lo que permite disminuir el impacto en el medio marino y reducir la necesidad de usar ingredientes procedentes del mar. Otra alternativa del uso del bagazo que se estudia hoy día es producir biobutanol a partir de este, ya que es un biocombustible que presenta un octanaje parecido al de la gasolina y que permite su uso sin modificar los motores de combustión [10].

A continuación, se detallan con brevedad algunas de las posibles alternativas de uso del bagazo.

3.1 Posibles alternativas de uso del bagazo cervecero

3.1.1 Fraccionamiento del bagazo

El fraccionamiento del bagazo cervecero consiste en la extracción de macromoléculas, que son lípidos, proteínas y carbohidratos, pudiendo ser este último almidón o celulosa. A continuación, se describe brevemente el proceso de la extracción de cada una de las macromoléculas mencionadas.

1. Extracción de lípidos: estudios muestran que una posible solución para la extracción de lípidos del bagazo es el método Soxhlet haciendo uso del hexano como solvente. La biomasa que resulta de este proceso es secada en una estufa a una temperatura de aproximadamente 60°C en un tiempo de 24 horas, con el objetivo de evaporar la máxima cantidad de restos de hexano posible. Además, la cuantificación de lípidos se lleva a cabo por métodos gravimétricos.
2. Hidrólisis enzimática del almidón: según estudios realizados, este proceso puede realizarse en dos etapas. La primera consiste en la hidrólisis enzimática del bagazo cervecero, y la segunda etapa corresponde a la hidrólisis enzimática al sobrenadante que se obtiene del bagazo cervecero.

De este modo, se efectúa en primer lugar la primera etapa, que es la hidrólisis enzimática del bagazo cervecero, y al finalizar esta etapa, las muestras son centrifugadas para separar pellet y poder obtener así el sobrenadante para su posterior hidrólisis.

En la primera etapa de hidrólisis del bagazo de cerveza se usa una enzima llamada alfa-amilasa

termoestable la cual se encarga de hidrolizar los enlaces alfa-glucosídicos del almidón. Esta enzima consigue la rotura de la amilosa que es la cadena lineal, y la amilopectina que se corresponde con la cadena ramificada, en azúcares de menor tamaño como por ejemplo la maltosa o glucosa.

Con respecto a la segunda etapa, las enzimas que se utilizan en la hidrólisis enzimática del sobrenadante es una glucoamilasa y una pululanasa. La primera rompe los enlaces de las cadenas lineales, mientras que la segunda enzima mencionada rompe los enlaces de las cadenas ramificadas. Con ambas enzimas se obtienen azúcares fermentables como la glucosa y maltosa.

3. Hidrólisis enzimática de celulosa y hemicelulosa: para este procedimiento las enzimas que se utilizan son CTEC Y HTEC. CTEC es un complejo de celulasas que hidroliza la celulosa, mientras que HTEC es un complejo de hemicelulasas que hidroliza la hemicelulosa.
4. Desagregación física e hidrólisis enzimática de proteínas: antes de hidrolizar el bagazo, existe una desagregación física de proteínas con el objetivo de fraccionar y aumentar el área superficial de contacto entre el bagazo y las enzimas.

Para todo esto hay que tener en cuenta que la presencia de las macromoléculas y la concentración de estas pueden variar según la muestra de bagazo, el tipo de malta que se emplea en el proceso de obtención de cerveza, el etilo de la cerveza e incluso las tecnologías empleadas en el proceso de producción de la cerveza. Además, el tamaño de las partículas del bagazo es un factor que puede variar los resultados.

3.1.2 Insumo del bagazo cervecero en la elaboración de una barra de cereales alta en fibra

Hoy día, científicos están en busca de residuos agroindustriales aprovechables que sean preferiblemente baratos y con un alto contenido proteico. Estas características las presenta el bagazo de cerveza.

Estudios muestran que la incorporación del bagazo en pan aumenta el contenido de proteínas en un 50% y duplica el contenido en fibras en comparación con los panes tradicionales sin bagazo de cerveza.

Desde hace varios años, un aumento significativo del consumo de comida rápida se ha observado como una respuesta al cambio del estilo de vida de la mayoría de la población donde los consumidores buscan alimentos fáciles y rápidos preparados. Es aquí donde las barras de cereales juegan un papel importante. La barra de cereales es un producto que se obtiene a partir de la mezcla o combinación de componentes con valores nutricionales y sabores específicos, añadiendo un ingrediente esencial para la barra de cereales que le confiere la textura adecuada.

En cuanto a la descripción del proceso de obtención de dichas barras de cereales, se da en primer lugar la recepción de la materia prima, que se corresponde con el bagazo de cerveza. A continuación, se da el primer pesado del bagazo. Finalizado el primer pesado, el bagazo pasa por un proceso de prensado con el objetivo de reducir su contenido en humedad de hasta mínimo un 65%. Tras el prensado, se pesa por segunda vez el bagazo para poder determinar la cantidad de agua que se reduce del producto. Hecho todo esto, el bagazo pasa por una etapa de secado hasta obtener una humedad que no supere el 12% en peso. Según estudios, se aconseja no secar a más de 65°C ya que de lo contrario se pueden generar sabores extraños en el producto final. Siguiendo con el proceso de producción de barras de cereales, el bagazo se moltura para de este modo reducir sus partículas y mejorar la textura del producto final. La siguiente etapa del proceso corresponde con el mezclado que se realiza de forma manual durante 10 minutos aproximadamente. Los ingredientes que conforman la base seca se corresponden con: hojuelas de trigo y de avena, el bagazo de cerveza, coco y pasas. En cuanto a la base líquida, los ingredientes que la conforman son: miel de abeja, mantequilla y azúcar. De este modo, se calienta la base líquida hasta 85°C y se agregan los componentes de la base seca. Conseguida la mezcla, se pasa a la etapa de moldeado y laminado, donde la masa se moldea en moldes de acero inoxidable. Una vez que la masa se encuentra en los distintos moldes, estos pasan a hornearse a una temperatura de alrededor de 100°C. Pasado 20 minutos aproximadamente después del horneado, se da el corte de las barras, las cuales pasan a enfriarse a una temperatura ambiente durante un tiempo de una hora. Cuando las barras consiguen estar a la temperatura ambiente, se empaquetan en un material resistente al vacío para evitar que la humedad del ambiente afecte a las barras de cereales. Y para finalizar, las barras se almacenan en un lugar fresco y libres de humedad.

3.1.3 Bagazo de cerveza utilizado en la alimentación del ganado

El bagazo de cerveza es un material muy valioso ya que contiene un alto contenido en proteínas, como se ha comentado anteriormente, y es un subproducto que se obtiene en grandes cantidades por la industria cervecera. Aunque este se obtiene con un alto contenido de humedad, que puede ser una limitación en su utilización ya que este puede ser deteriorado.

Por este motivo, tras la obtención del bagazo, este pasa por una etapa de secado con el fin de eliminar el contenido en humedad, obteniéndose bagazo seco. Si el secado se hace de forma estática, puede existir el riesgo de formación de hongos, por lo que esto debe hacerse removiendo periódicamente el bagazo.

Una alternativa de uso del bagazo para la alimentación del ganado es la realización de pellets con una proporción aproximada de 55% de bagazo y 45% de maíz molido. En este caso el porcentaje de proteína baja debido a que no todo es bagazo.

Además, para una mejor manipulación del bagazo, es preferible que presente una densidad aparente baja, otro motivo por el cual el bagazo sufre el proceso de secado. Aunque cabe destacar que al pelletizar el bagazo, se da un aumento de la densidad aparente, que no supone problemas. De todas formas, el bagazo puede ser consumido sin pelletizar, no existe la necesidad de hacerlo en forma de pellets para que puedan ser consumidos.

Con respecto a las tecnologías de secado, existen túneles de secado por aire frío y túneles de secado por microondas, aunque este último sigue investigándose. Otra alternativa posible es la utilización de hornos rotativos. Aunque es recomendable que el bagazo sea sometido a estas tecnologías con un porcentaje de humedad de alrededor de 40%, por lo que esto implica la separación previa del bagazo sólido y efluentes.

3.1.4 Generación de biogás a partir de bagazo cervecero

Como se ha comentado anteriormente, la industria cervecera genera residuos que pueden ser aprovechados como materias primas para otros procesos industriales.

El tratamiento de los residuos y efluentes generados mediante tecnologías de digestión anaerobias no solo alcanzan una estabilización de estos, sino también la generación de biogás. Este biogás que se genera puede aprovecharse para abastecer los requerimientos energéticos del proceso productivo.

Una vez que se obtiene el biogás, este debe pasar por una etapa de purificación y mejoramiento dando biometano apto para su aprovechamiento energético.

3.1.5 Obtención de compuestos antioxidantes a partir de bagazo cervecero

El bagazo de cerveza tiene un alto potencial de valorización debido a su composición rica en proteínas, carbohidratos y compuestos fenólicos, entre otros. Son los compuestos fenólicos los compuestos antioxidantes que presenta el bagazo.

La extracción de compuestos fenólicos del bagazo de cerveza sigue en estudio, aunque se han hecho ya algunos experimentos. Se trata de una investigación bastante interesante, debido a que, una vez extraídos los compuestos antioxidantes, estos pueden aprovecharse en múltiples de industrias, como es la farmacéutica, alimenticia o cosmética, entre otros.

Este proceso consta de un pretratamiento, donde se acondiciona el bagazo para su posterior extracción. Como segunda etapa es la extracción de compuestos fenólicos en sí. Y para finalizar, se da una última etapa que consiste en la purificación de dichos compuestos.

Una vez que se han descrito distintos usos del bagazo con brevedad, se describen y detallan con mayor profundidad dos alternativas de reutilización del bagazo, que se corresponden con la generación de biogás y la obtención de compuestos antioxidantes a partir de este. Se ha profundizado en estas dos alternativas debido a que presentan mayor interés a nivel industrial, ya que de ellas podemos obtener un aprovechamiento energético en el caso de la obtención de biogás, o materias primas de gran valor añadido como es en la obtención de compuestos antioxidantes.

3.2 Generación de biogás a partir de subproductos y efluentes líquidos mediante digestión anaerobia

En la industria cervecera se requieren altos consumos de energía térmica, la cual, principalmente procede de la combustión de gas natural. Esto es un gran problema para la industria debido a los constantes aumentos de los costes de la energía. De esta forma, con la producción de biogás, estos requerimientos energéticos podrían ser abastecidos en parte por energía renovable, ya que el biogás se consigue por la digestión anaerobia del bagazo, que es un residuo orgánico de la propia industria cervecera. Esto impacta positivamente en los costes de la industria, además de tener la posibilidad de disminuir el consumo de energía no renovables.

La industria de cerveza da origen a diferentes tipos de residuos, tanto sólidos como líquidos. De los residuos generados en la corriente sólida destacan el grano usado o bagazo que es el residuo sólido que se genera con mayor porcentaje con respecto a otros residuos sólidos. La levadura usada o incluso algunas proteínas coaguladas también se consideran residuos sólidos para dicha industria.

Con respecto a la corriente líquida, el agua representa el ingrediente principal en la producción de cerveza, además de que esta está presente en todas las etapas del proceso. Durante el proceso se genera un efluente líquido que comprende cantidades residuales de azúcares, sólidos, levaduras, junto a otros componentes.

La digestión anaerobia, también conocida como biometanización, es un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno. Parte de la materia orgánica de los residuos orgánicos se transforma, mediante la acción de microorganismos, en una mezcla de gases conocido como biogás. El biogás se compone principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), aunque también presenta en pequeñas cantidades amoníaco, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno.... Es un proceso complejo ya que depende de varios factores como la temperatura, el pH o sustancias inhibitorias, además de que interactúan organismos de distintas especies. La composición del biogás que se genera depende de la composición del sustrato utilizado y del diseño del sistema principalmente. Así, con este proceso se consiguen dos cosas: la disminución de los residuos y la producción de biogás [11].

La digestión anaerobia consta de cuatro etapas:

1. Hidrólisis de compuestos orgánicos complejos de cadena larga a moléculas más simples.
2. Acidogénesis: los compuestos orgánicos simples son fermentados por enzimas extracelulares, producidas por bacterias fermentativas. En esta etapa se obtiene H_2 , CO_2 , ácido acético y ácidos orgánicos.
3. Acetogénesis: Los ácidos orgánicos producidos en la etapa anterior son convertidos en ácido acético e hidrógeno. Además, una parte del hidrogeno y del dióxido de carbono son convertidos a ácido acético por bacterias homoacetogénicas.
4. Metanogénesis: bacterias metanogénicas reducen el CO_2 y el ácido acético para formar metano.

El bagazo es un sustrato que contiene principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina, aunque en cantidades menores también están presentes compuestos fenólicos, esto lo hace difícil para que pueda ser degradado en condiciones anaerobias. Se debe a la presencia de productos de la degradación como son los compuestos fenólicos, causantes de la inhibición del proceso. De este modo, se plantea un sistema en dos etapas, donde las etapas de hidrólisis y la metagónica se hagan separas.

El bagazo es el sustrato más favorable para la producción de biogás debido a la generación de grandes cantidades de este.

3.2.1 Digestión anaerobia

La variedad de rutas metabólicas disponibles para una comunidad bacteriana hace complejo el proceso de digestión anaerobia y sus mecanismos. Durante el proceso, al degradarse la materia orgánica compleja se forma un digestato estabilizado y un biogás compuesto mayoritariamente por metano y dióxido de carbono [12].

Es un proceso que consta de cuatro etapas, como se ha mencionado anteriormente: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estas etapas están relacionadas una con otras y se consigue una eficiencia alta cuando las tasas de degradación de todas las etapas son iguales. Por ejemplo, si la primera etapa es inhibida, los sustratos para las etapas siguientes estarán limitados, por lo que el proceso se verá interrumpido. Las rutas

metabólicas son las siguientes:

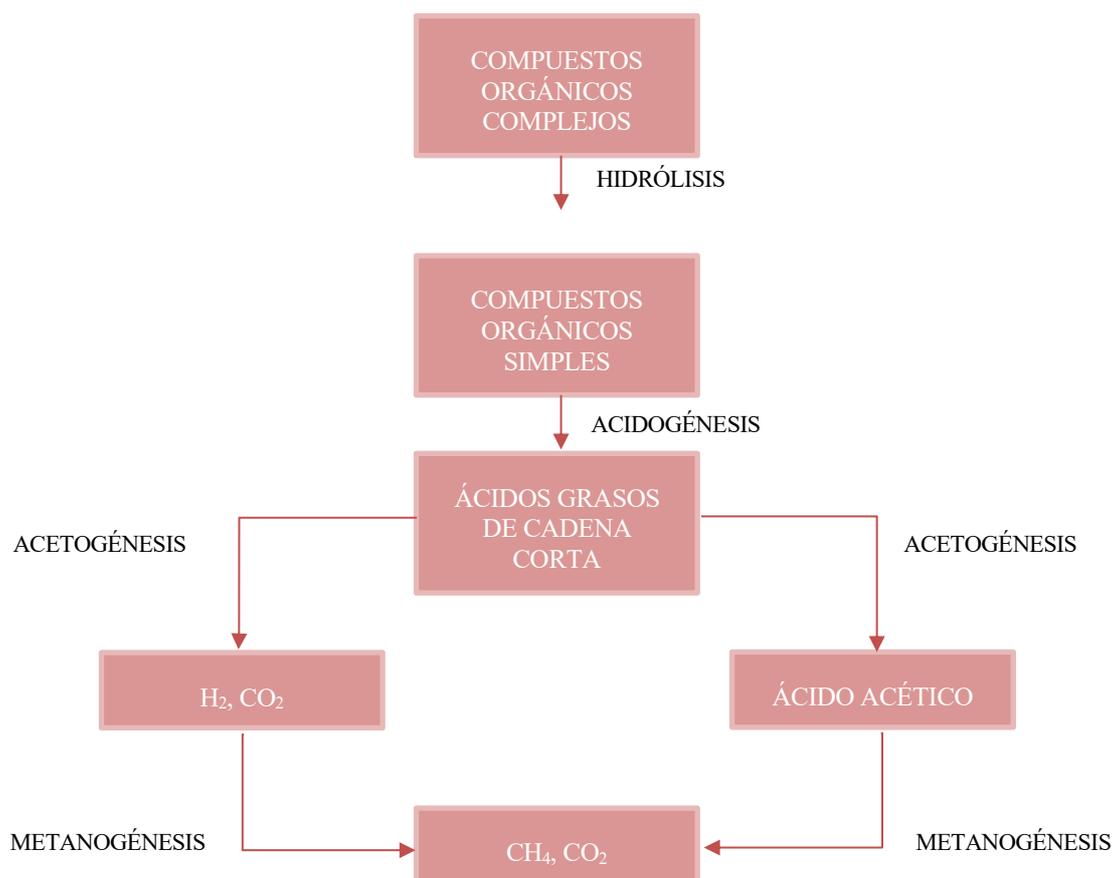


Ilustración 8. Rutas metabólicas del proceso de digestión anaerobia

A continuación, se procede a la explicación de las 4 etapas con mayor claridad.

- **Hidrólisis**

El objetivo de esta etapa es la conversión de compuestos orgánicos complejos a moléculas más sencillas para que estas puedan ser utilizadas como fuente de energía. Proteínas biopoliméricas, carbohidratos y lípidos se corresponden con las moléculas complejas, y estas son hidrolizadas a aminoácidos, azúcares simples y ácidos grasos respectivamente. Esto se consigue con las enzimas extracelulares [13].

- **Acidogénesis**

Las moléculas simples que se consiguen en la etapa de hidrólisis, durante esta etapa son convertidas en ácidos volátiles de cadena corta, como el ácido acético. El producto final de esta etapa dependerá de los sustratos iniciales y de las condiciones ambientales a los que están sometidos, especialmente la presión parcial del hidrógeno. Bajas presiones parciales del hidrógeno van a favorecer la formación de ácido acético, CO₂ e hidrógeno. Sin embargo, presiones parciales altas favorecerán la formación de ácidos orgánicos de gran tamaño, como el lactato y etanol, que es algo que no interesa en el proceso. Esto se debe a que el aumento de la presión parcial del hidrógeno inhibe la actividad de los microorganismos acetogénicos [12].

- **Acetogénesis**

Es en esta etapa donde las bacterias acetógenas y homoacetógenas juegan un papel importante. Las primeras

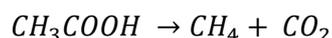
mencionadas son las encargadas de formar hidrógeno mientras que las segundas son consumidoras de este. Las bacterias acetógenas catabolizan ácidos orgánicos, alcoholes y ciertos compuestos aromáticos a ácido acético y CO_2 . Las bacterias homoacetógenas utilizan el hidrógeno y el dióxido de carbono para formar ácido acético. Además, el CO_2 puede ser reducido por H_2 para producir ácido acético, y ser utilizado en la siguiente y última etapa del proceso. Ácidos grasos de cadena corta son producidas a partir de hidrógeno y dióxido de carbono [13].

- **Metanogénesis**

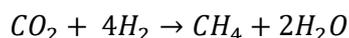
Esta es la última etapa del proceso. El metano es formado principalmente por ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Por lo tanto, todos los productos intermedios deben ser convertidos a compuestos que puedan ser usados, directa o indirectamente, por las bacterias metanogénicas.

Las bacterias metanogénicas se clasifican como arqueobacterias ya que presentan las siguientes características: pared celular no rígida, producción de metano como desecho metabólico y coenzimas especializadas. Estas coenzimas son la coenzima M, la F_{420} y la F_{430} [12].

El ácido acético es dividido para formar metano, sin embargo, el hidrógeno se combina con el dióxido de carbono para formar metano. Las dos reacciones que se dan serían las siguientes:



Reacción 1. Formación de metano.



Reacción 2. Formación de metano a partir de dióxido de carbono e hidrógeno.

La formación del metano a partir de la reacción 2, es decir, el que se obtiene a partir del hidrógeno, es un proceso más efectivo en términos de energía. Aunque esto sea así, solo se produce el 30% de metano por este método. Esto ocurre por la limitada cantidad de hidrógeno que hay disponible en el biodigestor. De este modo, el 70% restante corresponde con la producción de metano a partir de ácido acético [12].

La pequeña cantidad de energía obtenida del limitado número de sustratos que pueden digerir las bacterias metanogénicas hace que estas tengan una reproducción lenta.

Para la degradación de los compuestos orgánicos son necesarios altos tiempos de retención. Los tiempos de reproducción son aproximadamente de 3 días a 35°C a 50 días a 10°C. De este modo, son necesarios mínimo 12 días para obtener una población de bacterias metanogénicas considerables.

3.2.2 Condiciones y parámetros operacionales

Las bacterias metanogénicas obtienen escasa energía de la degradación de ácidos volátiles. Esto provoca que la tasa de crecimiento esté restringida, y como consecuencia la cantidad de sustrato por organismo es alta. De este modo, si el sustrato que ingresa en el digestor es poco degradable, la hidrólisis será el que limite la velocidad del proceso.

Las bacterias metanogénicas son anaerobias y son sensibles a los cambios de condiciones en el que se someten, como es la alcalinidad, temperatura, pH. El control de este proceso es complejo ya que hay que tener muchos parámetros en cuenta. Esto se debe a que hay presentes una amplia variedad de organismos en el digestor, los cuales soportan diferentes rangos de condiciones [12]. En la siguiente tabla se muestra las mejores condiciones para una actividad de bacterias metanogénicas y producción de metano aceptable.

PARÁMETRO	RANGO ÓPTIMO
Alcalinidad (g CaCO ₃ /L)	2-3
pH	6,5-7,2
Potencial redox (mV)	<-300
Temperatura psicrófila (°C)	15-18
Temperatura mesófila (°C)	28-33
Temperatura termófila (°C)	50-60

Tabla 1. Parámetros y condiciones operacionales

- **Alcalinidad y pH**

El pH es un parámetro muy importante para conseguir un desarrollo adecuado de los distintos microorganismos que participan en el proceso de digestión anaerobia.

- Microorganismos hidrolíticos: pH entre 7,2 y 7,4
- Microorganismos acetogénicos: pH entre 7 y 7,2
- Microorganismos metanogénicos: pH entre 6,5 y 7,5

Con la producción de ácidos volátiles en la etapa de acidogénesis, el pH tiende a caer. Una vez que las bacterias metanogénicas consuman dichos ácidos y produzcan alcalinidad, el pH aumentará y consigue estabilizarse. Cabe destacar que el contenido de dióxido de carbono en el biogás afecta al pH en un sistema anaerobio.

El sistema está formado por las diferentes formas en las que se puede encontrar el carbono inorgánico (dióxido de carbono, bicarbonatos, carbónico). Para mantener un valor más o menos constante del pH, es necesario mantener dicho sistema en equilibrio.

Es importante saber que cuando el pH se encuentre en valores por debajo de 6 o por encima de 8, el sistema se vuelve tóxico para la etapa de metanogénesis.

Cuando el digestor alcanza altas concentraciones de alcalinidad se consigue una estabilidad en el digestor. La disminución de la alcalinidad puede deberse a: acumulación de ácidos orgánicos por posibles fallos en la etapa de metanogénesis, por la traza de un agente inhibidor para la metanogénesis o por una simple descarga de ácidos orgánicos al reactor del proceso. Si la alcalinidad se ve afectada, esto provoca cambios inmediatos en el pH del sistema.

Los ácidos orgánicos se originan cuando se degradan los compuestos orgánicos, estos destruyen la alcalinidad. Esta va a ser recuperada cuando ocurra la última etapa del sistema, es decir, cuando se dé la metanogénesis.

Las condiciones en las que se introducen los residuos orgánicos en el digestor influyen en la alcalinidad del proceso. Por ejemplo, cuando el sustrato introducido contiene grandes cantidades de proteínas significa que se van a dar concentraciones altas de alcalinidad.

- **Potencial redox**

Para que los microorganismos metanogénicos se desarrollen, el potencial redox debe ser bajo. Este valor es inferior a -300 mV.

- **Nutrientes**

Para permitir un adecuado desarrollo de los microorganismos que participan en el proceso, los residuos que se desean digerir deben presentar una relación óptima de nutrientes. Los elementos con mayor importancia que se deben de tener en cuenta son: nitrógeno, carbono y fósforo. Aunque también pueden aparecer cobalto, hierro, níquel y sulfuro.

Para asegurar un correcto funcionamiento del digestor además de la degradación del sustrato, es necesario la introducción de nutrientes en los sistemas enzimáticos. El efluente del digestor debe de contener estos nutrientes también, por lo que es conveniente hacer un análisis de este. Esto evita la acumulación de ácidos grasos volátiles.

La relación que debe de mantener el carbono/nitrógeno se sitúa en un rango entre 15/1 y 45/1, aunque el valor que se recomienda es 30/1. Con respecto a la relación de carbono/fósforo, esta debe ser igual a 150/1, pero valores inferiores no van a crear problemas de inhibición.

- **Toxicidad**

La presencia de determinados compuestos en el digestor puede causar la inactividad de los microorganismos que se encargan de llevar a cabo la digestión anaerobia, provocando un desorden en la cinética de degradación de la materia orgánica.

Todo esto va a depender de la composición y concentración en la que se encuentren estas sustancias inhibidoras. Aunque hay que tener en cuenta que solo la fracción soluble provocan estos efectos. Algunos indicadores de toxicidad pueden ser: desaparición de hidrógeno, desaparición de metano, descenso de alcalinidad y/o pH, aumento de ácidos orgánicos volátiles. La presencia de materiales pesados también provoca estos efectos, pudiendo llegar a detener por completo la producción de biogás.

- **Temperatura**

La temperatura del sistema es un parámetro importante en el proceso anaerobio, ya que la temperatura va a influir en las velocidades de reacción con las que se lleven a cabo el proceso. También va a influir en la composición que se consiga del biogás, ya que la solubilidad de los gases va a depender de dicho parámetro. Además, hay que tener en cuenta que no todos los microorganismos encargados de este proceso soportan ciertas temperaturas. De este modo, la temperatura va a depender de lo que soporten las bacterias que participan en la digestión.

Las temperaturas podrán estar entre los siguientes rangos de temperatura:

- Rango psicrófilico: 15-18°C
- Rango mesófilico: 28-33°C
- Rango termófilico: 50-60°C

En la siguiente tabla se muestran con claridad los distintos rangos de temperatura:

RÉGIMEN	MÍNIMO	ÓPTIMO	MÁXIMO
Psicrófilico	4-10 °C	15-18 °C	20-25 °C
Mesófilico	15-20 °C	28-33 °C	35-45 °C
Termófilico	25-45 °C	50-60 °C	75-80 °C

Tabla 2. Rango de temperaturas

Desde el punto de vista técnico y económico, la elección de la temperatura es importante ya que por ejemplo si se trabaja en un rango termofílico, los equipos, tuberías y accesorios en general serán más caros. Aunque en este rango se consigue una destrucción mayor de agentes patógenos.

En último lugar, hay que mencionar que, si el residuo que se trata contiene una cantidad elevada de nitrógeno, puede formarse una cantidad significativa de amoníaco el cual es tóxico para el sistema. La concentración de amoníaco irá en aumento cuando las temperaturas del proceso son elevadas [14].

- **Condiciones de mezcla**

Lo que se pretende es conseguir una distribución homogénea entre las bacterias, el sustrato y los nutrientes que participan en el proceso. Por las siguientes razones que se mencionan a continuación es necesario mantener un grado de agitación en el biodigestor.

- Se alcanza una distribución uniforme de la temperatura, evitando una estratificación de temperatura. Se pretende conseguir una isoterma correcta.
- Evitar la formación de espumas y sedimentos.
- Mantener uniforme las condiciones tanto físicas como químicas.
- Rápida dispersión de los desechos tóxicos que ingresen o se formen en el sistema.

Estas condiciones de mezcla pueden ser posibles a través de métodos mecánicos o neumáticos. Esta última corresponde con una recirculación de gases donde se utilizan bombas para inyectarlo en el fondo del reactor. Los mezcladores mecánicos pueden conseguir eficiencias mayores, aunque pueden tener problemas como obstrucciones según la cantidad de sólidos que se estén trabajando.

- **Tiempo de retención**

Por tiempo de retención se entiende el tiempo promedio que pasa el sustrato dentro del digestor sometido a la actividad de los microorganismos. Se pueden considerar dos aspectos, el tiempo de retención hidráulico (TRH), que es el cociente entre el volumen y el caudal de tratamiento, por lo que está directamente relacionado con el caudal que va a ser tratado. Y el segundo aspecto es el tiempo de retención de los microorganismos, que es el tiempo que los microorganismos permanecen dentro del digestor [12].

La cantidad de metano que se va a generar depende por lo tanto del valor de TRH. De todas las condiciones operacionales que se han descrito, el tiempo de retención es el más importante si se habla de la conversión de sólidos volátiles a compuestos gaseosos.

- **Velocidad de carga orgánica**

Como velocidad de carga orgánica se conoce a la cantidad de materia orgánica que se introduce por unidad de volumen y tiempo. Cuando la velocidad de carga orgánica es baja significa que la concentración del sustrato a tratar es baja también o lo que es lo mismo, el tiempo de retención aumenta. Es por esto por lo que hay que intentar buscar un valor óptimo desde el punto de vista económico y técnico para cada instalación y residuo a tratar.

Entonces la velocidad de carga que se selecciona depende del diseño del reactor, el tipo de tecnología que se emplea, además de las características del residuo a tratar.

3.2.3 Digestión anaerobia del bagazo

Las partes por la cual está compuesto el bagazo son, la cáscara de grano conocido como pericarpio, y por la cobertura de las semillas. Ambas partes contienen celulosa, lignina y proteínas. Como se ha comentado con anterioridad, el bagazo es un material lignocelulósico rico en fibras y proteínas. Cabe destacar que el bagazo es un material que es difícil de degradar, esta dificultad de degradación se debe a la complejidad estructural que

presenta la lignina, además que tiene un alto peso molecular. También se debe a su estabilidad química y a su insolubilidad.

La complejidad estructural de la lignina se debe a que es un polímero que tiene compuestos fenólicos entrecruzados. La lignina se degrada en un ambiente aerobio, aunque también en uno anaerobio, pero con mayor dificultad. Por esta razón, el bagazo se somete a pretratamientos para conseguir dicha degradación anaerobia [12].

Así, la producción de biogás a partir del bagazo cervecero se consigue por digestión anaerobia en dos etapas, esto es debido a la presencia de productos de degradación, como son los compuestos fenólicos, causantes de la inhibición del proceso. Que se realice en dos etapas quiere decir que la hidrólisis y metanogénesis ocurran en etapas diferentes.

3.2.4 Tecnologías de digestión anaerobia

Para poder llevar a cabo la digestión anaerobia se pueden usar diferentes tecnologías que se pueden clasificar principalmente por digestión anaerobia en estado húmedo y seco. Esta distinción se hace en base a la concentración de sólidos totales presentes en el proceso de digestión.

- Digestión anaerobia en estado húmedo: es cuando el sustrato, es decir, el bagazo, tiene una concentración de sólidos totales inferior al 15%. Esta concentración puede alcanzarse mediante el agregado de agua, normalmente efluente líquido derivado de la misma actividad. De este efluente que se agrega es necesario conocer su composición para evitar añadir sustancias tanto nocivas o inhibitorias de la actividad microbiana.
- Digestión anaerobia en estado sólido: es cuando el sustrato presenta una concentración de sólidos totales de entre un 20 y 40%.

Para el caso del bagazo, la digestión anaerobia más eficiente es la que se hace en estado sólido. Esto es porque se minimizan problemas de flotación y estratificación, que son problemas característicos de los materiales fibrosos. Además, estas tecnologías presentan ciertas ventajas como son el menor tamaño del reactor empleado y menores requerimientos energéticos en general.

La fermentación es la conversión de la materia orgánica sólida a los precursores de metanogénesis, que son los ácidos grasos volátiles, H_2 y CO_2 , es decir, la fermentación corresponde con las etapas de acidogénesis y acetogénesis. La fermentación es el paso limitante en la digestión de materiales lignocelulósicos ya que este paso sucede muy lentamente [12].

Para poder llevar a cabo este proceso, la fermentación se da en un reactor con las siguientes características: debe estar rico en nutrientes, con un pH neutro, y donde el líquido no se acumula. Sin embargo, la etapa de metanogénesis ocurre en un reactor a pH ácido.

A continuación, se describen las diferentes etapas de todo el proceso en general, reflejando también las distintas tecnologías disponibles, para finalmente elegir las más adecuadas.

3.2.4.1 Pretratamiento

La necesidad de un sistema de pretratamiento se debe a lo comentado anteriormente. Como el bagazo es un material lignocelulósico, y la lignina presenta dificultades en su degradación, para evitar que esto ocurra en un tiempo prolongado, se hace uso de este pretratamiento.

Con el pretratamiento se consigue que el sustrato se acondicione para poder ser sometido a la biodegradación. Esto se consigue promoviendo la etapa de hidrólisis la cual está limitada por diferentes factores como pueden ser: grado de polimerización, contenido de humedad, la superficie de contacto que se encuentra disponible y el contenido de lignina que presenta el sustrato.

Las distintas alternativas de pretratamiento son las siguientes:

- **Pretratamiento mecánico**

El pretratamiento mecánico consiste en la reducción del tamaño de las partículas del bagazo. Con esta reducción

se consigue un aumento de la superficie específica además de una reducción en el grado de polimerización. Como consecuencia conlleva un aumento en la hidrólisis estos materiales lignocelulósicos [15].

Otra ventaja que presenta este pretratamiento es la disminución del tiempo de digestión. Además, este mecanismo no fomenta la producción de agentes inhibidores de la actividad microbiana.

Sin embargo, el pretratamiento mecánico presenta también algunas desventajas como son el alto requerimiento de energía para llevar a cabo el proceso de molienda, lo que conlleva un aumento en los costes de energía.

- **Pretratamiento térmico**

El pretratamiento térmico consiste en el calentamiento del bagazo. Una vez que se alcanzan valores de entre 150 y 180°C la hemicelulosa y la lignina empiezan a solubilizarse. Además, en el proceso de calentamiento se consigue la hidrólisis de la hemicelulosa, dando lugar a ácidos. Estos ácidos ayudan a la posterior hidrólisis del resto de la hemicelulosa [12].

Los productos que se obtienen tras la solubilización de la lignina son mayormente compuestos fenólicos. La formación de compuestos fenólicos aumenta en condiciones ácidas. Estos compuestos fenólicos son tóxicos o inhibidores para las comunidades bacterianas.

- **Pretratamiento ácido**

El objetivo del pretratamiento ácido es solubilizar la hemicelulosa, para que así la celulosa se encuentre más expuesta y alcanzable para su degradación.

De esta manera, esto se consigue tanto con ácidos concentrados como con ácidos diluidos. Aunque se consigue una mayor solubilización de la hemicelulosa con ácidos concentrados.

Este sistema de pretratamiento puede provocar la formación de compuestos tóxicos para los organismos de la etapa de metanogénesis. Aunque, estos organismos metanogénicos pueden tolerar concentraciones de los compuestos nocivos si se les da un tiempo de aclimatación [12].

Si se utilizan ácido sulfúrico o ácido nítrico, la actividad de los microorganismos metanogénicos se reduce por la presencia de H₂S y N₂ al reducirse el sulfato y nitrato respectivamente.

3.2.4.2 Tratamiento primario

Debido a las características de los residuos a tratar y de las tecnologías que se disponen para esto, surge la necesidad de aplicar tratamientos primarios tales como operaciones de separación de sólido-líquido y de desbaste.

Como se ha comentado anteriormente, para la digestión anaerobia del bagazo se opta por reactores en seco. Para poder utilizar estos tipos de reactores, es necesario que la corriente tenga una concentración de sólidos totales de entre un 20 y 40%.

A continuación, se describen las distintas alternativas que se pueden utilizar para este tratamiento primario:

- **Filtros de bandas a presión**

La suspensión que necesita ser filtrada se deposita entre dos bandas, donde se produce una brusca deshidratación sobre la banda inferior. Además, la suspensión se somete a cambios bruscos de dirección para poder conseguir la compresión necesaria para la deshidratación de la fase sólida.

Los parámetros que hay que tener en cuenta para dimensionar este equipo son la velocidad y la presión de sus bandas.

Una de las ventajas que tiene este equipo es que permite alcanzar altos grados de sequedad. Aunque este equipo tiene cierta complejidad de operación y un alto costo con respecto al mantenimiento.



Ilustración 9. Filtro de banda a presión

- **Filtros prensa**

Este tipo de filtros comprime un paquete de placas. Estas placas están constituidas por elementos filtrantes y en su interior se introduce la suspensión que se desea filtrar. Esto hace que se vaya formando una especie de torta, que son los sólidos con su humedad correspondiente. Cuando dicha torta consigue la consistencia que se desea a la presión deseada, la filtración se da por finalizada. El siguiente paso sería la descarga de la torta.

Este tipo de filtro se caracteriza por operar en ciclos, compuestos por las siguientes etapas: llenado de filtro, filtración, limpieza, apertura de la prensa, descarga de la torta.

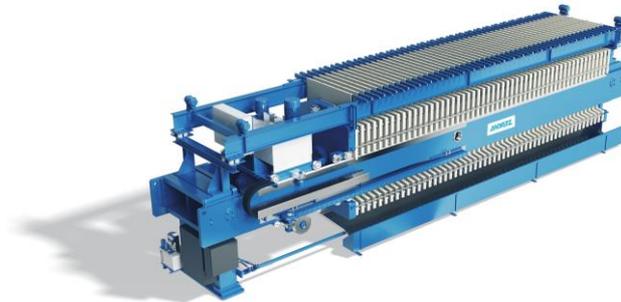


Ilustración 10. Filtro prensa

- **Tornillo prensa horizontal**

Este tipo de equipos operan de forma continua para la extracción de líquidos de una gran variedad de alimentos y muchos otros productos. Son aptos para materiales que tienden a compactarse.

Lo que se consigue con este equipo es un aumento gradual de la presión de los materiales que se desean filtrar, esto se hace contra un tamiz cilíndrico.

Una de las ventajas que tiene este equipo es que tiene la capacidad de conseguir diferentes grados de secado del material debido a un sistema de regulación que tiene. La extracción de líquido de materiales como el bagazo, es decir, fibrosos, se hace de manera eficiente.



Ilustración 11. Tornillo prensa horizontal

3.2.4.3 Tratamiento secundario

Se consideran tratamiento secundario a los sistemas diseñados para descomponer el contenido de materia orgánica mediante la actividad metabólica de microorganismos.

Es con este tipo de tratamiento donde se puede aprovechar la generación de biogás a partir del residuo que se genera en la industria cervecera, es decir, el bagazo.

- **Sistema de digestión anaerobia seca**

- Sistema Valorga

Consiste en un reactor cilíndrico vertical dividido por una pared también vertical en el centro del reactor. La alimentación es introducida y el sustrato se mueve lentamente alrededor de la pared vertical hasta que es descargado mediante la salida que se sitúa en la parte opuesta de la entrada [16].

El biogás que se recircula se inyecta mediante una red de inyectores que se encuentran en la base del reactor. Esto se hace con el objetivo de que cuando las burbujas asciendan, provoquen la agitación mecánica de la mezcla. Para evitar atascos, estos inyectores necesitan un mantenimiento continuo.

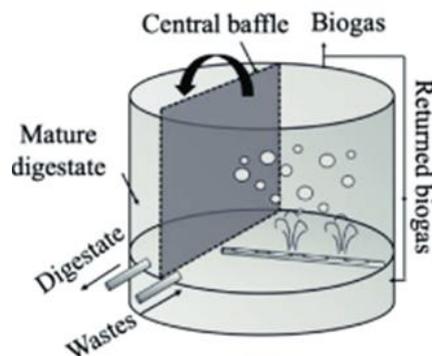


Ilustración 12. Digestor del sistema Valorga

- Sistema Kompogas

En este sistema se hace uso de reactores horizontales que tienen mezcladores axiales. Estos

transportan el sustrato hacia la salida del reactor. Mantienen los sólidos en suspensión y provocan la desgasificación del digestato [12].

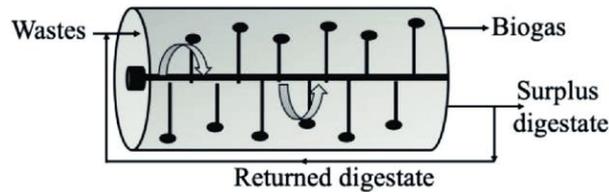


Ilustración 13. Digestor del sistema Kompogas

- Sistema Dranco

En este sistema se utilizan silos en forma vertical con un fondo cilindro-cónico. En este fondo se sitúa la descarga del reactor. Una de las características de este reactor es que no presenta un sistema de mezclado interno. Como aquí el residuo es introducido por la parte superior, la única agitación que ocurre es debido al flujo pistón descendente del residuo [12].

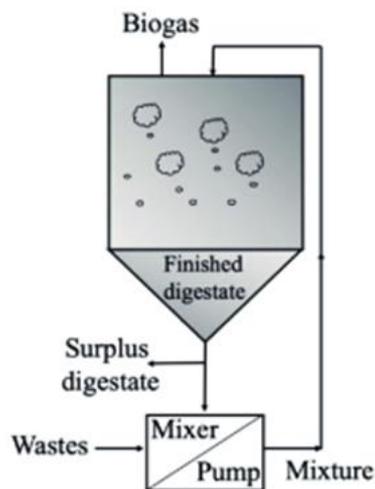


Ilustración 14. Digestor sistema Dranco

- Sistema “batch”

En este tipo de sistema el sustrato se deposita en contenedores herméticos. Esto quiere decir que dicho sustrato se mantiene en el reactor hasta conseguir su estabilización. Dependiendo de la composición y características del sustrato a tratar, el tiempo requerido del sustrato para que sea degradado dentro del reactor puede ser variable.

Tanto el digestato de un batch anterior, como los lixiviados de la digestión o la combinación de ambos pueden ser utilizados para el inóculo. Con respecto a los lixiviados, estos pueden introducirse en el reactor por recirculación, o por la incorporación inmediata en la entrada del

reactor junto con el sustrato que se desea tratar.

La desventaja que presenta este tipo de sistema es la falta de control sobre el proceso biológico. Además, no existe un sistema de mezcla, por lo que pueden producirse zonas en las que muchas sustancias lleguen a valores inhibitorios para los microorganismos encargados de la degradación [12].

- **Sistema de digestión anaerobia de carga alta**

Este tipo de sistema se utiliza para los efluentes líquidos industriales. Los microorganismos son retenidos dentro del reactor y se caracterizan por tener una alta actividad. Además, el tiempo de retención es corto, lo que se asocia con una reducción en el volumen del reactor.

- **Reactor UASB (“upflow anaerobic sludge blanket reactor”)**

Lo que caracteriza a este tipo de reactor es el flujo en dirección ascendente del efluente a tratar. Este efluente a través de un manto de lodos constituido por gránulos o partículas formadas biológicamente. En el fondo del reactor se encuentra una capa muy densa de los microorganismos (cama de lodos), mientras que en la parte superior del reactor estos microorganismos forman una capa más dispersa y menos densa (manto de lodos) [17].

La digestión de la materia orgánica ocurre en ambas capas y existe una mezcla dentro del reactor gracias al flujo ascendente del efluente.

Como se puede ver en la siguiente imagen, el efluente es inyectado por la parte inferior del reactor.

Este tipo de reactores contienen separadores de tres fases. Estos separadores se encargan de que las burbujas de gas que se forman se desprendan de los flocos de microorganismos que ascienden con el fluido. El fluido y los flocos entran en la zona de sedimentación ya que hay que evitar que los flocos o gránulos salgan del reactor.

Para la formación de estos flocos, se requiere de un tiempo bastante extenso, que es una desventaja para el sistema. Aunque poseen una serie de ventajas donde destaca que estos son reactores simples de fácil diseño. En la siguiente imagen se puede apreciar un esquema del reactor:



Ilustración 15. Reactor UASB

- **Sistema EGSB (“Expanded granular sludge bed”)**

Este sistema se diferencia con el anterior primeramente en el tipo de lodo formado por los microorganismos y el grado de expansión de estos.

Se caracteriza porque en la mayor parte del reactor el lodo se encuentra granulado.

En la parte superior de este reactor se encuentran la salida tanto la del efluente final, como parte

del efluente que se introduce, que será recirculado por la parte inferior como se muestra en la imagen. Este reactor consta de un cuerpo formado por un cilindro delgado donde se encuentra el lodo. Y en la zona inferior del sistema existe un soporte con una placa perforada por donde es introducido el efluente a tratar.

Una de las ventajas de este sistema es que al ser la relación de altura/diámetro muy grande, ocupa poco espacio en la instalación comparado con el resto de los reactores.

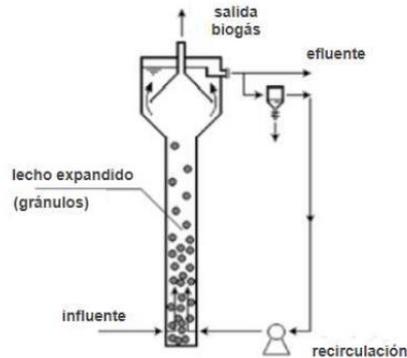


Ilustración 16. Reactor EGSB

3.2.4.4 Elección de las alternativas

En el apartado anterior se han mencionado y descrito las distintas alternativas posibles para todas y cada una de las etapas del sistema, por lo que en este apartado se exponen las alternativas seleccionadas y su correspondiente justificación.

Referente con la etapa de pretratamiento, estudios demuestran que la combinación del pretratamiento térmico con el pretratamiento ácido, consiguen considerables eficiencias dentro del sistema. Entonces, lo que se propone es agregar ácido clorhídrico (HCl) al 30% aproximadamente y aumentar la temperatura a 100°C. Se selecciona este compuesto porque es el más utilizado para este tipo de industria. Todo esto se lleva a cabo en una sola cámara. Dicha cámara consta de un sistema de mezclado para que todo se mantenga homogéneo. Con esto se consigue un aumento en la producción de biogás en un 120%.

Para la digestión anaerobia seca del bagazo el contenido en sólidos totales debe de estar entre un 30-40%, por lo que debe de contener una cantidad determinada de humedad. Para la disminución de esta humedad se ha optado por el tornillo de prensa horizontal ya que presentan robustez y es el que se utiliza con más frecuencia. Se caracterizan porque tanto su operación como instalación es fácil. Además, su descarga puede realizarse en la zona de carga del reactor de digestión anaerobia seca directamente, lo cual facilita al sistema.

Con respecto a la selección del sistema de digestión anaerobia seca, el sistema que mejor se ajusta tanto a nivel económico como operacional es el sistema tipo batch. Este se caracteriza por su sencillez en construcción y sus bajos costos de mantenimiento. Además, no necesita sistema de mezcla lo que le hace de un sistema más barato. Estos reactores presentan una inclinación en la parte de la carga del sustrato con el objetivo de que el sustrato no se acumule en esta parte del reactor, lo que favorece una carga homogénea en interior del reactor.

Para el caso de las tecnologías de digestión anaerobia para la corriente líquida, se ha optado por el reactor tipo UASB ya que presenta un bajo costo de operación, es sencillo con respecto al diseño y construcción, y puede operar con altas cargas orgánicas en bajos tiempos de retención. Además, es el más utilizado en la industria de la cerveza.

Por último, se va a estudiar el tratamiento y almacenamiento del biogás obtenido. En la mayoría de los casos, la

utilización inmediata del biogás no es posible ya que necesita una purificación previa.

El biogás cuando sale del reactor se encuentra saturado en vapor de agua. Además, presenta ciertas impurezas como puede ser el sulfuro de hidrógeno (H_2S). El sulfuro de hidrógeno es tóxico y se caracteriza por tener un olor parecido al de huevos podridos. Cuando se combina con agua puede dar lugar a la formación de ácido sulfúrico, que resulta ser corrosivo para los componentes que canalizan al biogás.

De este modo, en primer lugar, se cuenta con una torre de relleno en el cual interacciona los compuestos derivados del azufre con el medio filtrante. Se selecciona este mecanismo ya que cuenta con un menor costo de operación y es más simple. Además, presenta una ventaja que es el que medio filtrante puede renovarse y recuperarse, lo que supone un aumento de la vida útil.

Una vez pasado la etapa de desulfuración se procede a la separación del vapor de agua y se vuelve a pasar por un filtro para quitar las impurezas de azufre que no se hayan podido quitar en la desulfuración anterior.

Una vez pasada estas dos etapas se obtiene un biogás compuesto mayoritariamente por metano y dióxido de carbono. Es en este momento cuando el biogás puede ser utilizado para la generación de electricidad.

Si el biogás se utiliza como combustible, que es una alternativa de uso del biogás, es necesario hacer el conocido upgrading del biogás, que consiste en una operación de tratamiento de mejora y enriquecimiento del metano presente en el biogás, es decir, consiste en la eliminación prácticamente completa del dióxido de carbono y así obtener el conocido biometano. Para esto se puede optar por la utilización de filtros de membrana, aunque hay muchos otros métodos más como puede ser la separación criogénica o la absorción química. En los filtros de membrana se hace pasar el biogás a presión a través de esos filtros, que son más permeables al CO_2 que al CH_4 . Presentan un bajo costo de mantenimiento y su operación es fácil.

Cuando ya se obtiene el biometano es utilizado directamente para satisfacer los requerimientos energéticos del proceso.

Por último, sería necesaria la instalación de una antorcha para que se accionen en caso de emergencia o parada de la planta. Cuando el uso del biogás no sea posible, este se quema dentro de la cámara de combustión de la antorcha. Con esto se consigue que se libere dióxido de carbono a la atmósfera, y no metano que tiene un mayor impacto como gas de efecto invernadero.

De esta forma, el esquema general de la digestión anaerobia del material lignocelulósico queda de la siguiente forma:

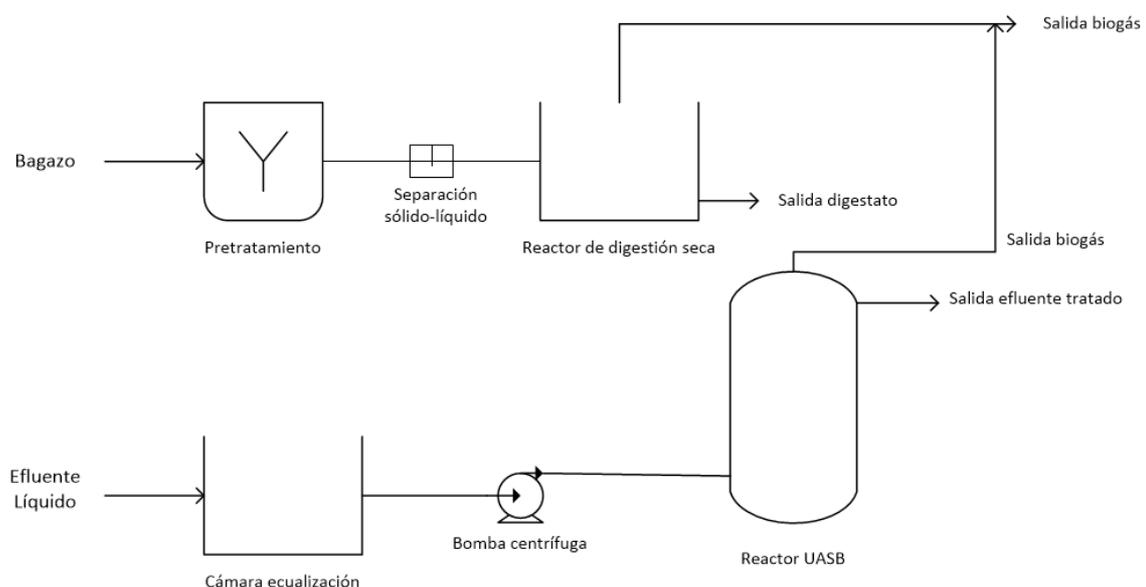


Ilustración 17. Digestión anaerobia

3.3 Obtención de compuestos antioxidantes a partir del bagazo cervecero

En general, los alimentos y materias primas contienen lípidos en mayor o menor cantidad. Son los lípidos los compuestos que sufren procesos de oxidación, llegando a tener consecuencias como: deterioración del alimento al presentar aromas rancios, variación del color, eliminación de nutrientes o generación de sustancias perjudiciales.

De este modo, por compuestos antioxidantes se conoce a sustancias que son capaces de inhibir las reacciones de oxidación mediante diferentes mecanismos. Diversos alimentos y plantas comprenden antioxidantes de forma natural y estos se añaden a los alimentos que no cuentan con estos compuestos con el objetivo de que duren más en el tiempo. Sin embargo, debido a los altos costes que esto supone, estos antioxidantes naturales se sustituyen por antioxidantes sintéticos que son más económicos, aunque no más saludables.

Por consiguiente, se propone un proceso para la obtención de dichos compuestos a partir del bagazo que se forma en la industria cervecera. Así, se exponen distintas alternativas para cada una de las etapas necesarias en este proceso. Una vez expuesto cada una de estas alternativas, se escoge para obtener un único proceso.

3.3.1 Compuestos antioxidantes

Los compuestos antioxidantes que presenta el bagazo de cerveza son los compuestos fenólicos. Estos compuestos son los encargados del crecimiento y reproducción de las plantas, es decir, son uno de los principales metabolitos secundarios. Tienen como objetivo actuar como agentes protectores frente a posibles patógenos [18].

Los compuestos fenólicos están compuestos por un anillo aromático junto con un grupo hidroxilo. En la siguiente figura se puede ver con claridad:

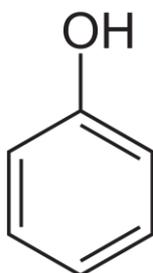


Ilustración 18. Grupo fenol

Una de las principales características que presentan estos compuestos son su actuación como antioxidantes ya que tienen la capacidad de estabilizar a los radicales libres, que son los causantes de iniciar y propagar las reacciones de oxidación, mediante un mecanismo conocido como la deslocalización electrónica. Este mecanismo se ve favorecido con el aumento de grupos hidroxilo unidos al anillo fenólico. Lo que se pretende es la conversión de este grupo fenólico en un radical fenoxi, ya que resulta ser más estable y puede llegar a parar la cadena de propagación.

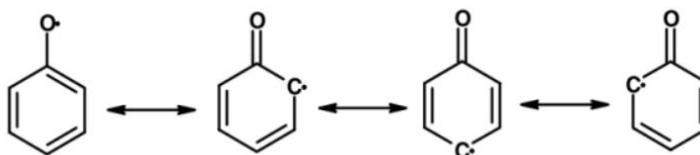


Ilustración 19. Deslocalización electrónica

3.3.1.1 Tipos

De forma general, los compuestos fenólicos pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: ácidos fenólicos, diterpenos fenólicos, flavonoides y aceites volátiles. Y dentro de cada grupo se sitúan distintas especies fenólicas antioxidantes con propiedades similares. En la siguiente tabla se recoge de forma más visual.

GRUPO	ESPECIES ANTIOXIDANTES
Ácidos fenólicos	Gálico, protocatéquico, p-cumárico, cafeico, rosmarínico, ferúlico, sináptico
Diterpenos fenólicos	Carnosol, ácido carnósico, rosmanol
Flavonoides	Quercetina, catequina, rutina
Aceites volátiles	Eugenol, carvacrol, timol, mentol

Tabla 3. Clasificación compuestos fenólicos [19]

3.3.1.2 Compuestos fenólicos presentes en el bagazo cervecero

Distintos tipos de compuestos fenólicos antioxidantes están presentes en el bagazo cervecero. Los compuestos que se encuentran en mayor proporción son los ácidos fenólicos y los flavonoides. Con respecto a los ácidos, los que destacan son el ácido ferúlico y el ácido p-cumárico, aunque también aparecen en menor proporción el ácido gálico, el cafeico y el sinapico. Estos tienen como objetivo atrapar los radicales libres. En cuanto a los flavonoides que se encuentran en mayor proporción son la catequina y la quercetina, los cuales se encargan de la eliminación de estos radicales libres [18]. La estructura que presentan estos compuestos se representa a continuación:

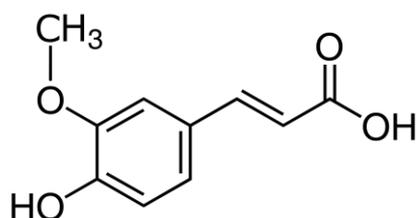


Ilustración 21. Ácido ferúlico

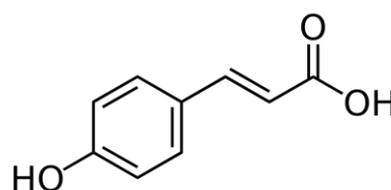


Ilustración 20. Ácido p-cumárico

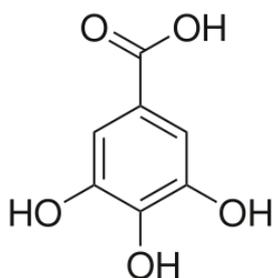


Ilustración 23. Ácido gálico

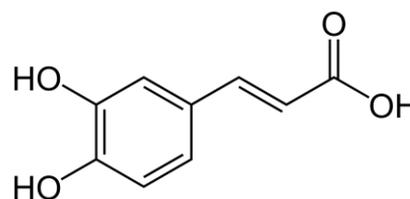


Ilustración 22. Ácido cafeico

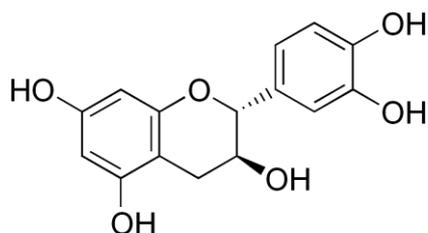


Ilustración 24. Catequina

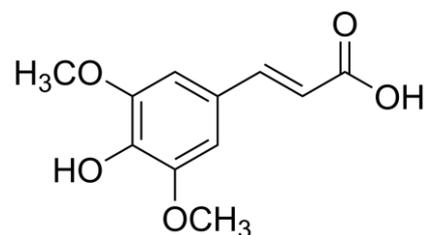


Ilustración 25. Ácido sinápico

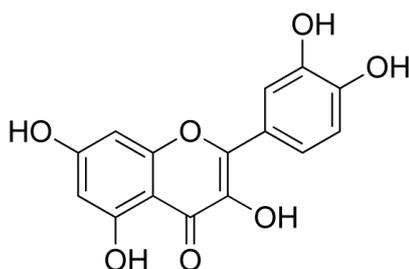


Ilustración 26. Quercetina

3.3.1.3 Proceso de obtención de los compuestos fenólicos antioxidantes del bagazo cervecero

El proceso que se realiza para obtener los compuestos antioxidantes procedente del bagazo de cerveza consta de tres etapas. En primer lugar, se va a dar una etapa de pretratamiento, a continuación, la etapa de extracción de dichos compuestos antioxidantes y para finalizar, se realiza una etapa de purificación.

- **Pretratamiento**

Esta primera etapa de pretratamiento consiste en acondicionar el bagazo para su posterior etapa que es la de extracción. Su objetivo principal es la modificación de la estructura del bagazo para poder facilitar el acceso al disolvente que se va a encargar de extraer los compuestos fenólicos presentes en el bagazo en el caso que la extracción sea por métodos convencionales, que se explicará posteriormente. Además, se consigue un aumento del área superficial para facilitar el contacto entre el disolvente empleado y el soluto, que en este caso son los compuestos fenólicos. Algunos de estos procesos son la maceración, la homogeneización o la molienda. Los factores que se deben de tener en cuenta para la elección de este pretratamiento pueden ser la polaridad, la acidez, la presencia de grupos hidroxilo, la concentración de compuestos fenólicos, etc.

- **Extracción**

Esta etapa es la principal etapa del proceso, puesto que es aquí donde se extraen los compuestos fenólicos del bagazo. Se basa en el transporte del compuesto de interés que se encuentra en la fase sólida, hacia una fase líquida, producto de la mezcla con el disolvente utilizado. Esto se consigue por los distintos grados de solubilidad de los compuestos presentes en el bagazo con el disolvente utilizado.

Los compuestos fenólicos se sitúan en la cáscara de los granos de bagazo, es decir, la parte sólida del bagazo. De este modo, haciendo uso de un disolvente determinado se consigue la separación de los compuestos fenólicos de esta fase sólida para su posterior aprovechamiento. En la mayoría de los casos, el disolvente que se emplea es agua con disolventes orgánicos como por ejemplo el metanol, acetato de etilo o cloroformo. Aunque con este método se produce una buena recuperación de compuestos fenólicos, presenta varias desventajas, como es la cantidad de disolvente que se tiene que utilizar, y el tiempo de extracción que en la mayoría de los casos es muy largo. Además, una vez que se finalice la extracción, el disolvente que se emplea debe ser eliminado en su totalidad para poder emplearse en industrias alimentarias, farmacéuticas, etc.

De este modo, con el avance de la tecnología, han surgido nuevos métodos más eficientes y limpios, en las que no se utilizan disolventes para conseguir la extracción de los compuestos fenólicos, y con un coste inferior. En apartados posteriores se analizan las diferentes alternativas posibles para realizar la extracción.

- **Purificación**

Una vez que se obtienen los compuestos fenólicos de la etapa de extracción, se hacen pasar por una etapa de purificación con el objetivo de separar los compuestos no fenólicos que puedan estar presentes en el extracto para poderlo enriquecer de compuestos fenólicos, que es el objetivo de este proceso.

En esta etapa se consigue eliminar tanto el disolvente que se emplea como los compuestos no deseados. Una alternativa puede ser una operación de adsorción que consiga separar los compuestos fenólicos presentes en el extracto junto con un proceso de membranas para poder deshacerse de las proteínas y polisacáridos, aunque de esto último depende de la concentración en la que estos compuestos se presenten.

3.3.1.4 Selección de alternativas

En este apartado se describen las diferentes alternativas posibles para cada una de las etapas del proceso de obtención de compuestos antioxidantes. Además, se escoge la técnica más adecuada para poder llevar a cabo dicho proceso.

- **Pretratamiento**

Como se ha mencionado anteriormente, las alternativas posibles para el pretratamiento son la maceración, la homogeneización y por último la molienda. Cada una de ellas son descritas a continuación:

- **Maceración**

Esta técnica consiste en dejar el sólido, es decir, el bagazo cervecero, sumergido en líquido con el objetivo de conseguir un ablandamiento de dicho sólido para que la separación de los compuestos solubles sea más fácil [18].

- **Homogeneización**

La homogeneización es un proceso físico que tiene como objetivo conseguir que el bagazo que se va a tratar adquiera las mismas propiedades en cada uno de sus puntos utilizando la agitación y la mezcla, es decir, convertir la mezcla heterogénea en homogénea [18].

- **Molienda**

La molienda consiste en romper la cáscara del grano que contiene el bagazo, ya que es aquí donde se encuentran los compuestos fenólicos que se desean extraer. Además, se intenta conseguir una desintegración para que sea más fácil el acceso a éstos [18].

- **Extracción**

Existen diversas técnicas de extracción de compuestos fenólicos presentes en el bagazo, y a continuación se describen con brevedad algunas de estas técnicas. Además, se plasma en una tabla las ventajas y desventajas que presentan cada una de éstas.

Los métodos más tradicionales emplean solventes orgánicos, reacciones alcalinas y extracción Soxhlet. Aunque ha habido un avance tecnológico debido a la dificultad de detección y obtención de los compuestos deseados, como por ejemplo extracción con fluidos presurizados, extracciones supercríticas, etc [1].

- **Extracción convencional**
 - Empleo de solventes orgánicos

Consiste en una extracción directa entre el bagazo y el solvente apropiado que se vaya a utilizar. Según estudios realizados, este solvente suele ser metanol, etanol y acetona, entre otros, además de sus correspondientes mezclas con agua, es decir, agua-metanol, agua-etanol y agua-acetona.

Este método se caracteriza por ser bastante efectivo y fácil, aunque se necesitan grandes cantidades del disolvente que se vaya a utilizar, además de un elevado tiempo de extracción.

Según [20], entre todos los experimentos realizados, con distintos solventes y porcentajes de estos, el que mayor eficiencia de extracción de compuestos fenólicos presenta es la mezcla de acetona con un 60% v/v y el resto agua. De este modo, se puede concluir que, para una extracción efectiva de los compuestos fenólicos de diferentes fuentes naturales, especialmente fuentes proteicas como es el caso del bagazo, se puede usar una mezcla de acetona-agua de entre un 50 y 95 % v/v de dicho solvente orgánico.

También se ha comprobado que la mezcla de acetona-agua resulta ser más efectiva que si se hace uso de acetona pura, debido a que esta mezcla crea un medio más polar que favorece la extracción de los compuestos fenólicos. Sin embargo, usar como solvente el agua pura no es efectivo debido a que los compuestos fenólicos son más solubles en solventes orgánicos menos polares que el agua [20].

- Hidrólisis alcalina

La extracción alcalina hace referencia a una extracción convencional sólido-líquido en el que se hace uso de un disolvente alcalino. El compuesto más utilizado para esta extracción es el hidróxido de sodio (NaOH) en diferentes concentraciones [21].

Debido a que, dentro de los ácidos fenólicos presentes en el bagazo cervecero, el ácido ferúlico y el ácido p-cumárico se encuentran en mayor proporción, la solución alcalina resultante de este proceso tendrá en mayor proporción dichos ácidos.

De este modo, dependiendo de las condiciones en el que se someta este proceso, es decir, la concentración de NaOH empleado, la temperatura del sistema y el tiempo de reacción, se obtienen diferentes resultados [21].

Cabe destacar que a medida que aumenta la temperatura, la concentración de ácido ferúlico aumenta. Tanto el tiempo de reacción como la concentración de NaOH tuvieron menos repercusión en los resultados obtenidos. Aunque la interacción entre la concentración de NaOH y la temperatura tuvieron valores positivos, lo que significa que el ácido ferúlico se puede ver incrementado con altas concentraciones de NaOH y temperaturas combinadas [21].

Con respecto al ácido p-cumárico, los parámetros de mayor a menor repercusión en los valores obtenidos de dicho ácido son en primer lugar la concentración de NaOH, en segundo lugar, la temperatura del sistema, y en último lugar, el tiempo de reacción [21]

- Extracción Soxhlet

La extracción Soxhlet es un procedimiento en el que el sólido que está finamente pulverizado se coloca en un cartucho de material poroso. Esto se sitúa en la cámara del extractor Soxhlet, como se puede ver en la figura [22].

El disolvente que se va a utilizar para la extracción se calienta en el matraz, para que el vapor que se forma condense sobre el cartucho que contiene la muestra sólida, y así poder extraer los compuestos solubles. Los disolventes que se emplean con esta técnica pueden ser: metanol, etanol, acetona, mezcla de acetona con agua, etc [18].

La ventaja que presenta esta técnica es que es fácil de realizar y no es necesario ningún proceso de filtración adicional para eliminar el disolvente utilizado. Pero presenta desventajas como el tiempo de extracción que es elevado o la cantidad de disolvente que se emplea que son caros y peligrosos.

Según estudios realizados, para obtener altas eficiencias de extracción de compuestos fenólicos, las condiciones de operación con mayor efectividad son emplear 150 ml de etanol como disolvente por

cada 3 gramos de bagazo cervecero y dejar un tiempo de funcionamiento de al menos 4 horas [23].

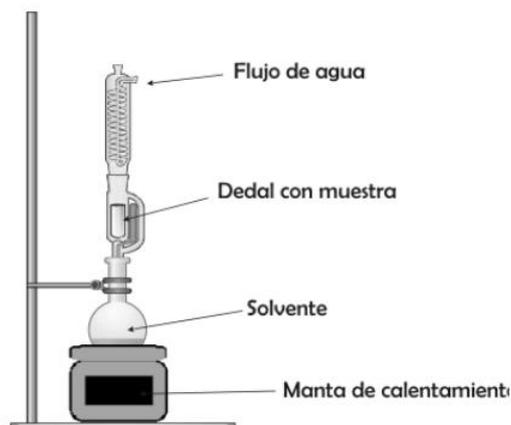


Ilustración 27. Extracción Soxhlet

- Extracción avanzada
 - Extracción asistida con microondas

El microondas es una tecnología que trabaja con radiaciones electromagnéticas comprendidas en un rango de 0,3-300 GHz. La energía que se transmite por las ondas penetra en la materia e interactúa con las moléculas polares de los disolventes con el objetivo de generar calor, para poder así extraer los compuestos fenólicos del bagazo [24].

Los disolventes que se emplean son el metanol, la acetona y una solución acuosa de NaOH [18].

Esta tecnología presenta una serie de ventajas que son: velocidades de calentamiento rápidas, tiempo de extracción corto y reducción notable del uso de disolventes orgánicos. Aunque tiene como inconveniente que necesita una filtración posterior para separar el disolvente utilizado.

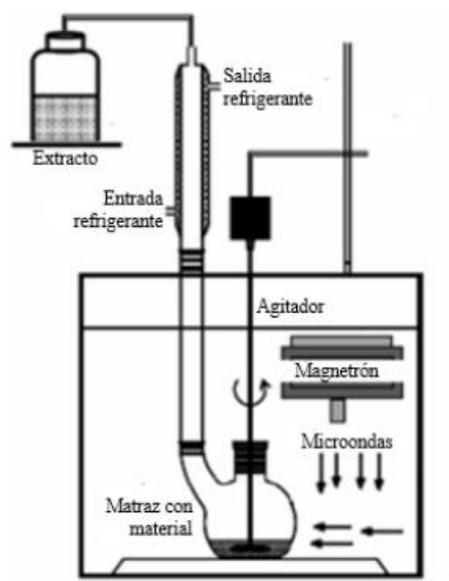


Ilustración 28. Extracción asistida por microondas

- Extracción asistida por ultrasonido

En todas las técnicas descritas anteriormente, se modifican las propiedades físicas del disolvente utilizado para reducir la tensión superficial y mejorar de este modo la transferencia de materia. Sin embargo, el mecanismo de esta operación es el uso de vibraciones mecánicas causadas por ondas de sonido con frecuencias mayores a 20 kHz.

Estas vibraciones causan ciclos de expansión y compresión en el medio, creando burbujas en el líquido. Una vez que estas burbujas no puedan absorber más energía se colapsan y es cuando aparece el efecto de cavitación en el disolvente, permitiendo la penetración de este a través del compuesto de interés, es decir, el bagazo. Con esto se consigue la solubilización de los compuestos fenólicos y finalmente su extracción con un mayor rendimiento [24].

El disolvente más utilizado para esta técnica es el etanol en pequeñas cantidades [18].

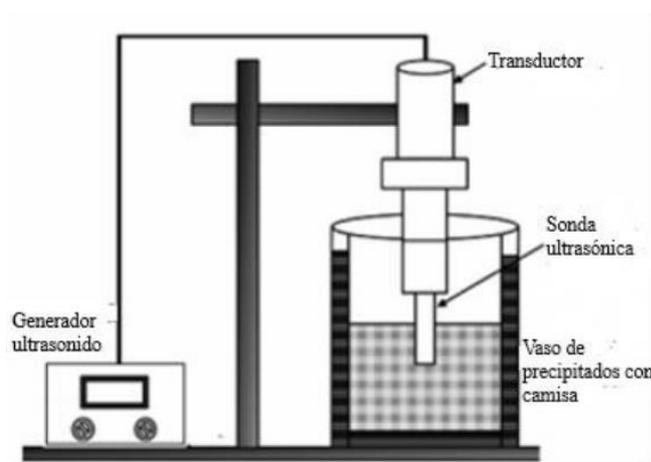


Ilustración 29. Extracción asistida por ultrasonido

• Purificación

Como etapa final tenemos la purificación, que consiste en eliminar el disolvente empleado en la etapa anterior que se encuentra mezclado con los compuestos fenólicos extraídos para que dichos compuestos fenólicos puedan ser utilizados en otras industrias de interés. De este modo, se puede emplear el proceso de adsorción, donde los compuestos deseados, es decir, los compuestos fenólicos, queden retenidos en una matriz sólida.

La adsorción es una técnica simple que permite recuperar, concentrar y purificar simultáneamente los compuestos objetivo. Es un proceso por el cual los átomos o moléculas de la fase fluida interactúan con los átomos o moléculas de la fase sólida, por lo que quedan retenidos [25]. De este modo, el proceso de adsorción consta de tres etapas: adsorción, reacción superficial y la desorción.

Dependiendo del tipo de interacción que se dé, la adsorción puede clasificarse en:

- Adsorción física o fisisorción, donde no existe reacción química.
- Adsorción química o quimisorción, donde si existe una reacción química.

○ Cinética

Como se ha dicho anteriormente, la adsorción es un proceso que se divide en etapas en serie. Las etapas que suceden en este proceso son:

1. En primer lugar, el soluto que en este caso son los compuestos fenólicos, se difunden desde la fase fluida hasta la capa de fluido que rodea al adsorbente. Esta etapa se conoce como transporte externo de materia.
2. A continuación, el soluto se difunde por el interior de los poros del adsorbente. Etapa conocida como

transporte interno de materia.

3. En tercer lugar, se da la reacción química en los centros activos del adsorbente. Esta etapa se conoce como adsorción.

Al proceso global lo puede controlar una o varias etapas. La etapa limitante del proceso vendrá determinada por las características que presente tanto el adsorbente como el adsorbato. Además, se deberá tener en cuenta diversas características como, el tamaño de partículas del adsorbato, el tamaño de los poros del adsorbente, la velocidad del fluido, la presión y temperatura, la concentración que tiene el adsorbato en el fluido, el grado de afinidad entre el adsorbato y adsorbente, etc. Aunque estudios muestran que en la mayoría de los casos la etapa que controla el proceso es la de la transferencia interna de materia [26].

Con respecto a la característica del grado de afinidad entre el adsorbente y el adsorbato hay que tener especial cuidado, ya que pueden existir varios compuestos de la fase fluida que tengan un grado de afinidad similares con respecto a la fase sólida. Esto se conoce como coadsorción, en el que varios compuestos de la fase fluida sufran el proceso de adsorción. Este fenómeno dificulta el proceso de desorción debido a que será mas complicado separar el compuesto de interés. De este modo, hay que asegurarse antes de realizar dicho proceso, que los compuestos que puedan ser adsorbidos presenten diferente capacidad de adsorción.

- Efectos en las condiciones de operación

Para una buena optimización de la capacidad de adsorción y su velocidad, es necesario establecer unas condiciones de operación correctas tanto del material adsorbente como del soluto a purificar.

- Temperatura

La temperatura puede afectar en dos cosas al proceso, la primera es que, al aumentar la temperatura, aumenta la velocidad de transporte de materia tanto externo como interno, ya que disminuye la viscosidad del fluido. Y la segunda, es que, al aumentar la temperatura, disminuye la capacidad del adsorbente.

Se han realizado experimentos para comprobar el rango de temperatura óptimo para obtener un mayor porcentaje de compuestos fenólicos adsorbidos. Las temperaturas fijadas en dichos experimentos han sido: 27°C, 40°C y 60°C. Resultados obtenidos muestran que a temperaturas más bajas se consiguen mayores rendimientos de adsorción. Por lo que se confirma que la adsorción de compuestos fenólicos se ve favorecido a temperaturas bajas, aproximadamente a la temperatura ambiente [27].

- Concentración inicial de soluto

El aumento de la concentración inicial del soluto implica un aumento en la capacidad de adsorción del adsorbente. Esto se debe a que aumenta la diferencia de concentración entre el soluto de la fase fluida, y el soluto en el adsorbente, es decir, aumenta la fuerza impulsora [26].

- Diámetro de partícula

Como se ha comentado con anterioridad, la etapa que controla el sistema es la transferencia interna de partícula. De este modo, al trabajar con partículas del adsorbente más pequeños, se reduce el recorrido que tiene que hacer el soluto, y con ello el tiempo. Además, con una disminución del tamaño de partícula aumenta la superficie específica de adsorción, lo cual es otra ventaja [26].

- Regeneración

Se precisa de una regeneración del adsorbente cuando este se agote, es decir, cuando ya no pueda adsorber más soluto. Esta regeneración consiste en extraer los compuestos adsorbidos y hacer que el adsorbente vuelva a tener la capacidad de adsorber.

Existen diversas formas de regenerar el adsorbente. Una de las alternativas es la regeneración térmica, donde se hace pasar por la columna un fluido caliente, por lo que el efecto del aumento de temperatura hace que las sustancias adsorbidas se evaporen. El inconveniente de esta regeneración es que el aumento de temperatura

puede dañar los compuestos fenólicos y llegar a producir su degradación.

Por este motivo, lo que se aconseja para regenerar los adsorbentes que han adsorbido compuestos fenólicos es introducir otro fluido que produzca la desorción de dichos compuestos. Este fluido se puede introducir en la misma dirección que el fluido que quiero adsorber o en contracorriente. Además, se hace en las mismas condiciones que el proceso de adsorción [28].

- Materiales adsorbentes

Existen diversos materiales que se pueden usar como adsorbente. Los más comunes se exponen y describen a continuación:

- Carbón activado

El carbón activado es un adsorbente muy común y utilizado que se puede utilizar en casi todas las aplicaciones industriales. Este tipo de adsorbente se puede caracterizar como un grafito en bruto con una estructura aleatoria o amorfa, poroso, con una amplia gama de tamaño de poros. Estos poros van desde grietas visibles a simple vista hasta poros a nivel molecular.

Estos poros se pueden dividir según su función, ya que existen poros adsorbentes, que son los encargados de adsorber, y poros de transporte, que se encargan del transporte de las moléculas que se adsorben [29].

Este tipo de adsorbente se utiliza también para recuperar los fenoles de las aguas residuales. Sin embargo, la naturaleza irreversible del proceso de adsorción y la necesidad de regenerar los carbones activados a alta temperatura o mediante el uso de productos químicos pueden limitar su uso [28].

- Zeolitas

Las zeolitas son un grupo de minerales que pertenecen a la familia de aluminosilicatos cristalinos microporosos y que se caracterizan porque tienen la capacidad de adsorber [30].

Las zeolitas pueden ser naturales o sintéticas. Existen más de 40 tipos diferentes de zeolitas naturales, y cada una de ellas se caracterizan porque tienen una composición ligeramente diferente que les permite adsorber diferentes moléculas. Y de zeolitas sintéticas existen más de 100 variedades [30].

Las zeolitas están compuestas por tetraedros formados por un catión y cuatro átomos de oxígeno. El catión puede ser silicio, aluminio o incluso germanio, aunque el silicio predomina [31].

Al igual que ocurre con el carbón activado, las zeolitas son muy poco usadas para la adsorción de compuestos fenólicos procedentes de biomasa lignocelulósica. Sin embargo, si los fenoles que hay que adsorber se encuentran en aguas residuales, entonces sí se puede hacer uso de las zeolitas como adsorbentes [28].

- Resinas sintéticas

Las resinas sintéticas son fabricadas mediante reacciones de polimerización, poliadición o policondensación. Por lo tanto, se caracterizan por tener una estructura polimérica, áreas superficiales internas de elevado tamaño y una estructura homogénea.

Las resinas son los adsorbentes más estudiados ya que presentan características como su limitada toxicidad, estabilidad química, alta capacidad de adsorción, selectividad y por la facilidad de regeneración a temperaturas moderadas [25].

Son las resinas de tipo no iónica las que se utilizan con mayor frecuencia para la adsorción de compuestos fenólicos puros y extractos naturales [25].

Una de las ventajas que presentan estos tipos de adsorbentes es que permiten la regeneración no térmica produciéndose de este modo una reducción en los costes energéticos, permitiendo

así su aplicación en sectores de alimentos y farmacéuticos [28].

- Tipo de adsorbedores

Los procesos de adsorción se pueden llevar a cabo en distintos tipos de reactores entre los que destacan, adsorbedores de lecho fijo y adsorbedores discontinuo de tanque agitado. Las características principales de cada uno de ellos se describen a continuación:

- Adsorbedor de lecho fijo

Este tipo de adsorbedor se caracteriza porque el material adsorbente se encuentra fijo en el interior de la columna. Es el fluido el que atraviesa este lecho mientras que va saturándolo.

Primeramente, el adsorbente se encuentra limpio. De este modo, todo el soluto queda retenido en el adsorbente y el fluido que sale de la columna está prácticamente libre de este compuesto. Pero a medida que pasa el tiempo, el adsorbente se va saturando, llegando a adsorber menos soluto. Por lo que la concentración de soluto del fluido tratado a la salida de la columna va a aumentar. Es por esto por lo que el parámetro de control del proceso es la concentración del soluto a la salida de la columna.

Cuando esta concentración supera ciertos valores, el sistema se detiene indicando el agotamiento de la capacidad de adsorción del adsorbente.

Así, el valor máximo de la concentración de soluto a la salida de la columna se le conoce como punto de ruptura.

El adsorbedor de lecho fijo es el que se emplea mayoritariamente en procesos industriales, además, es el que mejor se adecua a las condiciones para la retención de compuestos fenólicos presentes en un fluido líquido [26].

- Adsorbedor discontinuo de tanque agitado

En este tipo de adsorbedor, la columna se carga del adsorbente y del fluido que contiene el soluto que queremos separar. Esta mezcla se somete a agitación.

Finalmente se descarga de la columna el fluido que no ha sido adsorbido, mientras que el soluto queda retenido en el adsorbente empleado [26].

3.3.1.5 Selección del proceso

En el apartado anterior se ha descrito las distintas alternativas posibles para el proceso de obtención de compuestos fenólicos a partir del bagazo. A continuación, se va a proceder a la selección de la técnica más adecuada según estudios realizados por otros autores.

Con respecto al pretratamiento, las alternativas posibles para esta etapa son la maceración, la homogeneización y la molienda. De las tres descritas, la más adecuada para preparar el bagazo para la etapa de extracción se corresponde con la molienda. Estudios demuestran que, para una mayor eficiencia en la extracción de los compuestos fenólicos, hay que romper los granos del bagazo hasta obtener partículas de un tamaño de 0,85 mm aproximadamente. Con esto se consigue aumentar el área superficial entre el disolvente y el sólido para la posterior etapa de extracción [32].

Para la extracción existen múltiples alternativas que se pueden aplicar para la obtención de compuestos fenólicos. Estudios muestran que, para maximizar la extracción de los compuestos fenólicos, se emplea una técnica convencional de extracción donde se hace uso de un disolvente. En concreto, se usa acetona al 60% v/v en una relación de 20 ml de disolvente por gramo de bagazo. El tiempo necesario para la extracción es de alrededor 30 minutos a una temperatura aproximada de 60°C [20]. Existe un aseguramiento de no dañar a los compuestos fenólicos debido a que las condiciones a la que se somete la etapa de extracción son suaves porque la temperatura de operación no es extremadamente alta. Cabe destacar, que se ha hecho la selección de esta alternativa ya que

la extracción con disolvente es un proceso simple. Además, para las técnicas de extracción avanzada se necesitan equipos más complejos y especializados, por lo que los procesos se vuelven más costosos económicamente.

En cuanto a la última etapa del proceso, es decir, para la purificación de los compuestos fenólicos se ha tomado la siguiente decisión. Se ha elegido la alternativa de adsorción en un reactor de lecho fijo. Esto consiste en que la fase fluida donde se encuentran los compuestos fenólicos atraviesa un lecho fijo que conforman los adsorbentes, donde quedan retenidos dichos compuestos. De este modo, es necesario la selección del tipo de adsorbente que mejor se adecue al proceso en cuestión. En esta ocasión se va a emplear una resina no iónica, debido a que se consiguen mayores rendimientos de adsorción de compuestos fenólicos según la bibliografía consultada.

Tras la etapa de adsorción se necesita una etapa de desorción para extraer de la resina los compuestos adsorbidos. Para ello, se hace uso de otro fluido que arrastre los compuestos fijados por la resina. El fluido que se emplea para la desorción es de una corriente de agua para desorber los carbohidratos que hayan podido ser adsorbidos e inmediatamente pasar una corriente de etanol para extraer los compuestos fenólicos de la resina. Finalmente, para eliminar el etanol se hace una evaporación al vacío para obtener como producto los compuestos fenólicos puros [28].

3.3.1.6 Descripción del proceso. Diagrama de bloques

El proceso de obtención de compuestos fenólicos a partir del bagazo de cerveza se divide en tres etapas fundamentales: pretratamiento, extracción y purificación del producto.

El bagazo que se obtiene como subproducto en la industria cervecera se almacena para su posterior molienda. A continuación, tiene lugar la segunda etapa, que se corresponde con la extracción en un extractor de tanque agitado al cual se le introduce el bagazo molido, y el disolvente que es acetona a un 60% v/v, por lo que hay que introducir agua. La corriente de salida de esta segunda etapa se almacena a la espera de la siguiente etapa, que corresponde con la etapa de adsorción. Es aquí donde los compuestos fenólicos son retenidos en la resina y separado de la acetona que se ha utilizado en la etapa anterior. Finalmente tiene lugar la etapa de desorción, donde en primer lugar se introduce una corriente de agua que se encarga de extraer los carbohidratos que pudiera contener la resina, y después de esto se introduce etanol para recuperar los compuestos fenólicos.

Tras esta etapa, el etanol se separa a través de una evaporación a vacío y es devuelto a su almacenamiento. Una vez obtenidos los compuestos fenólicos, se secan y purifican para obtenerlos en estado sólido para un mejor almacenamiento de estos.

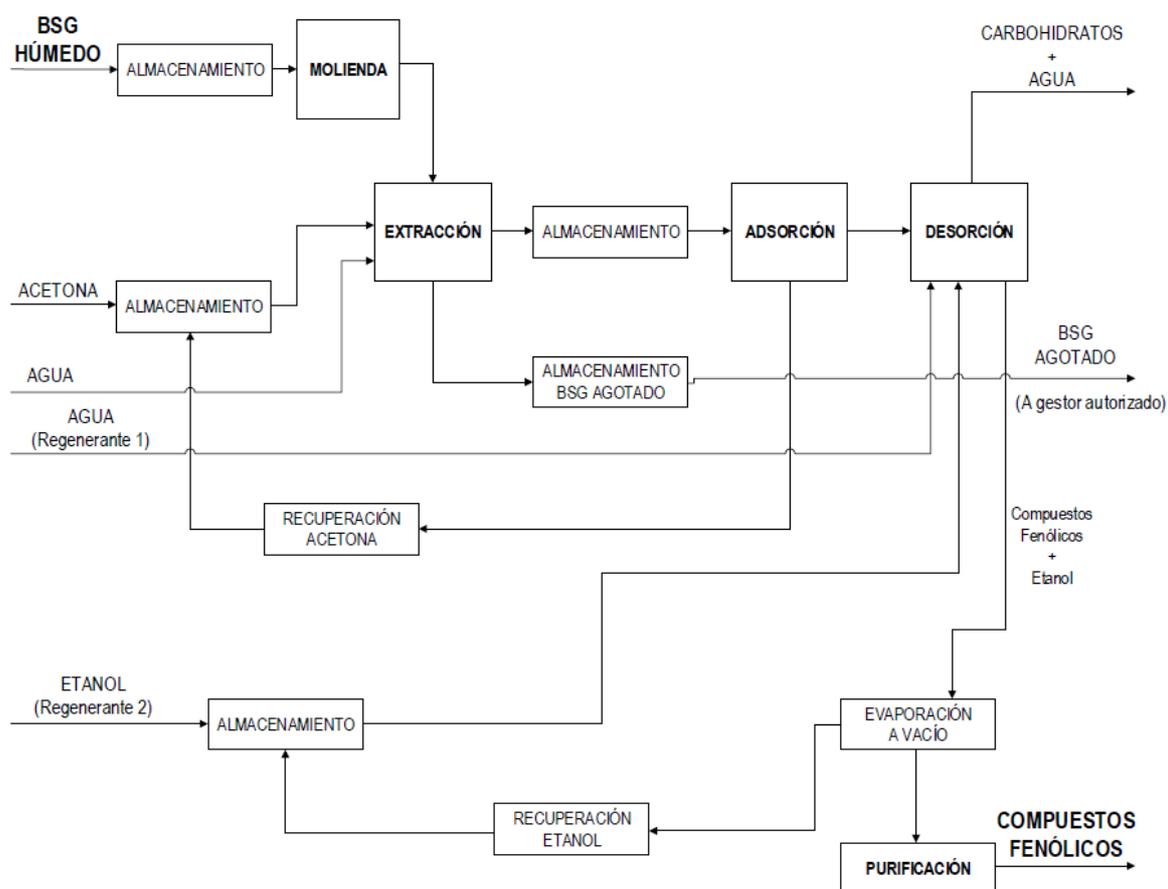


Ilustración 30. Planta para la obtención de compuestos fenólicos antioxidantes

4 BALANCE DE MATERIA

Para iniciar el balance de materia, lo primero de todo se tiene que saber cuánta cerveza se quiere producir anual o mensualmente, para así saber la cantidad de materia prima que se necesita para que pueda ser posible.

Por lo tanto, si la fábrica de cerveza tiene una producción de 70.000 litros de cerveza al mes (8.400.000 litros de cerveza al año), que corresponde con la producción de una fábrica pequeña de cerveza artesana. Las cantidades de materias primas necesarias para poder producir esa cantidad de cerveza son las siguientes:

- Por cada litro de cerveza producida se necesitan 2 litros de agua.

$$70.000 \frac{l \text{ cerveza}}{\text{mes}} \cdot \frac{5 l \text{ agua}}{1 l \text{ cerveza}} = 3.500.000 \frac{l \text{ de agua}}{\text{mes}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Que se corresponden con,

$$3.500.000 \frac{l \text{ de agua}}{\text{mes}} \cdot \frac{1 Kg \text{ agua}}{1 l \text{ agua}} = 3.500.000 \frac{Kg \text{ agua}}{\text{mes}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

- Se necesitan 200 gramos de malta por litro de cerveza producida.

$$70.000 \frac{l \text{ cerveza}}{\text{mes}} \cdot \frac{200 g \text{ malta}}{1 l \text{ cerveza}} \cdot \frac{1 Kg}{1.000 g} = 14.000 Kg \frac{\text{malta}}{\text{mes}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Se va a suponer que la cantidad de malta es la misma que la del cereal.

- Por litro de cerveza producida son necesarios 2 gramos de lúpulo.

$$70.000 \frac{l \text{ cerveza}}{\text{mes}} \cdot \frac{2 g \text{ lúpulo}}{1 l \text{ cerveza}} \cdot \frac{1 Kg}{1.000 g} = 140 Kg \frac{\text{lúpulo}}{\text{mes}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

- Se necesita 1 gramo de levadura por cada litro de cerveza.

$$70.000 \frac{l \text{ cerveza}}{\text{mes}} \cdot \frac{1 g \text{ levadura}}{1 l \text{ cerveza}} \cdot \frac{1 Kg}{1.000 g} = 70 Kg \frac{\text{levadura}}{\text{mes}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Todas esas cantidades calculadas son las necesarias para producir 70.000 litros de cerveza al mes, aunque en los tanques de almacenamiento y en la nevera para el caso del lúpulo se va a disponer del doble de cantidad ya que algunos de los procesos precisan de días de producción y por si hubiera algún fallo en el proceso.

La cerveza que se obtiene se va a envasar en botellines de 200 mililitros, lo que corresponde con una producción de:

$$70.000 l \text{ cerveza} \cdot \frac{1 \text{ botellín}}{0,2 l \text{ cerveza}} = 3.500.000 \frac{\text{botellines}}{\text{mes}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Una vez realizado el balance de materia, la cantidad de bagazo que se produce mensualmente corresponde con 27.750,45 kg al mes, lo que es lo mismo 333.005,4 kg al año. Esta cantidad de bagazo va a ser tratados por las distintas alternativas que reutilización de bagazo que se han propuesto en los apartados anteriores del proyecto. En primer lugar, la primera alternativa de uso es la de la digestión anaerobia del bagazo, en el cual se produce

biogás para destinarlo a la generación de electricidad, o bien tratar el biogás para poder utilizarlo como combustible.

Como segunda alternativa de uso del bagazo, se propone extraer las sustancias antioxidantes que el propio bagazo contiene.

5 VIABILIDAD ECONÓMICA

Para hacer un estudio de la viabilidad económica de las dos alternativas propuestas para la reutilización del bagazo, primero se calcula el coste fijo y una vez que se conozca este, se pasa al cálculo del coste variable de cada alternativa. Y para finalizar, se establece el precio mínimo de venta para compensar las ventas con los gastos.

Con respecto a los costes fijos, se ha efectuado la estimación de los equipos principales del proceso junto con los gastos de explotación que estos conllevan. Los costes de los equipos se han calculado mediante correlaciones y los precios de cada equipo son extraídos de la calculadora McGraw-Hill Higher [33].

Hay que tener en cuenta que los datos sacados de dicha calculadora corresponden con los precios del año 2002, por lo que el precio sería correcto para dicho año. De este modo, los precios hay que adaptarlos para este año, es decir, el 2022. Para ello, se utiliza un factor llamado Índice CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index), que corrige los costes de los equipos para obtener resultados actualizados. Se establece entonces una relación entre el índice actual y el índice del año 2002. Teniendo en cuenta que el CEPCI del año 2002 es 390,4 y el CEPCI del año 2022 es 723, la relación de los precios es la siguiente [34] [35]:

$$\frac{C_{2022}}{C_{2002}} = \frac{CEPCI_{2022}}{CEPCI_{2002}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Despejando de la ecuación el coste de 2022 se obtiene el coste actualizado, ya que el resto son todos datos. Por ejemplo, para el coste de la cámara con sistema de mezclado para el proceso de la obtención de biogás:

- El coste que se obtiene de la calculadora McGraw, C_{2002} es 17.271€
- CEPCI 2022 es 723
- CEPCI 2002 es 390,4

Con estos datos y despejando el coste que se corresponde con 2022, sería 31.951€. De esta forma se calculan el resto de los equipos principales, tanto del proceso de obtención del biogás como del proceso de obtención de antioxidantes.

5.1 Obtención de biogás a partir de bagazo cervecero

A continuación, se muestra en la siguiente tabla los precios de los equipos principales del proceso, el número total de ese equipo, y el precio total. El material usado para los equipos es acero inoxidable válido para la industria alimentaria, es decir, INOX 304, que resulta ser más barato que INOX 316. Como se ha comentado anteriormente, los precios de los equipos se han obtenido en la calculadora McGraw-Hill Higher.

EQUIPO	COSTE UNIDAD (€)	Nº. DE EQUIPO	COSTE TOTAL (€)
Cámara con sistema de mezclado	31.951	1	31.951
Tornillo de prensa horizontal	62.530	1	62.530
Reactor batch	63.033	1	63.033
Reactor para efluente	41.636	1	41.636

Tanque de almacenamiento	119.846	1	119.846
COSTE TOTAL EQUIPOS			318.996

Tabla 4. Coste de los equipos principales

Los precios que aparecen en la tabla 4 son precios correspondientes al año actual, es decir, han sido actualizados con la relación señala en la ecuación 7.

Para calcular el coste total de la planta se ha hecho uso del método de Chilton. Existen diversos métodos más, pero el método Chilton es el más común. Este parte del coste total de los equipos principales, donde se usan una serie de correlaciones y factores que establece el método en función de las características de la planta. De esta forma, se puede dividir entre coste directo, que hace referencia a los elementos físicos que forman la planta; y los costes indirectos, que se corresponden con los costes asociados a la gestión de esos elementos físicos, como por ejemplo construcción, tamaño de la planta, etc.

En la siguiente tabla se muestra el coste total de inversión, que corresponde con la suma de los costes directos e indirectos mencionados anteriormente.

COSTES DIRECTOS	FACTORES DE COSTO	COSTE (€)
Equipos	1	318.996
Instrumentación	$0.1 * C_{\text{equipo}}$	31.899
Impuestos de ventas	$0.03 * C_{\text{equipo}}$	9.569
Transporte	$0.05 * C_{\text{equipo}}$	15.949
Coste total		376.413
COSTES DIRECTOS DE INSTALACIÓN	FACTORES DE COSTO	COSTE (€)
Cimentación	$0.12 * C_{\text{directos}}$	45.169
Obra Civil	$0.4 * C_{\text{directos}}$	150.565
Electricidad	$0.01 * C_{\text{directos}}$	3.764
Red de tuberías	$0.3 * C_{\text{directos}}$	112.923
Aislante	$0.01 * C_{\text{directos}}$	3.764
Pintura	$0.01 * C_{\text{directos}}$	3.764
Coste total		319.919
COSTES INDIRECTOS INSTALACIÓN	FACTORES DE COSTO	COSTE (€)
Ingeniería	$0.1 * C_{\text{directos}}$	37.641

Gastos de construcción	$0.1 * C_{\text{directos}}$	37.641
Honorarios del contratista	$0.1 * C_{\text{directos}}$	37.641
Puesta en marcha	$0.01 * C_{\text{directos}}$	3.764
Pruebas de funcionamiento	$0.01 * C_{\text{directos}}$	3.764
Contingencia	$0.03 * C_{\text{directos}}$	11.292
Coste total		131.743
COSTE TOTAL DE INVERSIÓN		828.075

Tabla 5. Coste total de inversión

Una vez conocido el coste total de inversión el siguiente paso es calcular el coste total de producción. El método seleccionado considera el coste de las materias primas del proceso que en este caso no existen costes relacionados estas, ya que las materias primas del proceso de obtención de biogás corresponden con los subproductos obtenidos de la industria cervecera; el coste total de inversión que es el coste calculado anteriormente, y el coste anual en operarios.

El coste anual de operarios se estima con la siguiente ecuación:

$$MOD = N^{\circ} \text{ operarios} \cdot \text{Salario} \left(\frac{\text{€}}{\text{hora}} \right) \cdot 8.000 \frac{\text{horas}}{\text{año}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Se considera 8.000 horas como un valor típico anual. Y el número de operario supuesto para la planta es de dos. Además, el salario típico corresponde con 6€/hora.

Además, existen múltiples de gastos en la planta, como es el coste de mantenimiento, seguros, impuestos, entre otros. Según el método Chilton, estos costes pueden estimarse como porcentajes de los costes ya calculados. Todo esto se recoge en la siguiente tabla:

ELEMENTO DE GASTO	ESTIMACIÓN	COSTE (€/AÑO)
Materias primas	-	0
Materias auxiliares	5% gastos de mantenimiento	2.070
ELEMENTO A		2.070
Mantenimiento	5% Coste capital fijo	41.403
Mano de obra		96.000
Cargas de capital	12% amortización	99.369
Seguros	1% coste total de inversión	8.280
Impuestos locales	2% coste total de inversión	16.561
Royalties	1% coste total de inversión	8.280
ELEMENTO B		269.893

ELEMENTO C	30% (A+B)	81.589
COSTE TOTAL PRODUCCIÓN	A+B+C	353.552

Tabla 6. Costes asociados a la producción

Una vez obtenido el coste total de producción al año, se puede calcular el precio mínimo del biogás frente al payback. Se genera 921 toneladas de bagazo y agua residual al año, y se sabe que por cada 22.000 toneladas de residuos se produce 2 millones de metros cúbicos de biogás. De esta forma, se producen 104.659 kilogramos de biogás al año.

Entonces, para igualar el coste de producción, el precio del biogás se corresponde con:

$$\frac{353.552\text{€}}{104.659\text{ kg}} = 3,37 \text{ €/kg} \quad (\text{Ecuación 9})$$

El precio es un poco elevado al precio que normalmente se vende el biogás debido a que se trata de una cervecería artesana con poca capacidad de producción, por lo que no se genera tanto bagazo y efluentes líquidos.

5.2 Obtención de compuestos fenólicos a partir de bagazo cervecero

En esta alternativa se van a usar los mismos criterios descritos en la alternativa de producción de biogás. De esta forma, en primer lugar, se calculan los precios de los equipos principales, que se recogen en la siguiente tabla.

EQUIPO	COSTE UNIDAD (€)	Nº. DE EQUIPO	COSTE TOTAL (€)
Molino	29.509	1	29.509
Columna de extracción	63.033	1	63.033
Reactor de lecho fijo	63.033	1	63.033
COSTE TOTAL EQUIPOS			155.575

Tabla 7. Coste equipos principales

Una vez conocido el precio total de los equipos principales, se puede pasar a calcular el coste de inversión de la planta, que siguiendo el criterio del método de Chilton se obtienen los siguientes resultados.

COSTES DIRECTOS	FACTORES DE COSTO	COSTE (€)
Equipos	1	155.575
Instrumentación	0.1* C_{equipo}	15.557
Impuestos de ventas	0.03* C_{equipo}	4.667
Transporte	0.05* C_{equipo}	7.778
Coste total		183.577
COSTES DIRECTOS DE INSTALACIÓN	FACTORES DE COSTO	COSTE (€)

Cimentación	$0.12 * C_{\text{directos}}$	22.029
Obra Civil	$0.4 * C_{\text{directos}}$	73.430
Electricidad	$0.01 * C_{\text{directos}}$	1.835
Red de tuberías	$0.3 * C_{\text{directos}}$	55.073
Aislante	$0.01 * C_{\text{directos}}$	1.835
Pintura	$0.01 * C_{\text{directos}}$	1.835
Coste total		156.037
COSTES INDIRECTOS INSTALACIÓN	FACTORES DE COSTO	COSTE (€)
Ingeniería	$0.1 * C_{\text{directos}}$	18.357
Gastos de construcción	$0.1 * C_{\text{directos}}$	18.357
Honorarios del contratista	$0.1 * C_{\text{directos}}$	18.357
Puesta en marcha	$0.01 * C_{\text{directos}}$	1.835
Pruebas de funcionamiento	$0.01 * C_{\text{directos}}$	1.835
Contingencia	$0.03 * C_{\text{directos}}$	5.507
Coste total		64.248
COSTE TOTAL DE INVERSIÓN		403.862

Tabla 8. Coste total de inversión

Y de la misma forma que en la anterior alternativa, a partir de los costes calculados hasta ahora, se pueden calcular los costes de operación de la planta en un año. En cuanto a la mano de obra también se han considerado dos operarios en planta y 6€/hora de salario.

ELEMENTO DE GASTO	ESTIMACIÓN	COSTE (€/AÑO)
Materias primas	-	0
Materias auxiliares	5% gastos de mantenimiento	1.009
ELEMENTO A		1.009
Mantenimiento	5% Coste capital fijo	20.193
Mano de obra		96.000
Cargas de capital	12% amortización	48.463
Seguros	1% coste total de inversión	4.038

Impuestos locales	2% coste total de inversión	8.077
Royalties	1% coste total de inversión	4.038
ELEMENTO B		180.809
ELEMENTO C	30% (A+B)	54.545
COSTE TOTAL PRODUCCIÓN	A+B+C	236.363

Tabla 9. Coste total de producción

La extracción de compuestos antioxidantes se da con una relación de aproximadamente 114kg/año por 48.000 de bagazo anuales, por lo que en esta planta se producen 66,5 kg/año.

Para igualar a los costes de operación, los compuestos deben venderse a:

$$\frac{236.363 \text{ €}}{66.5 \text{ kg}} = 3.554 \text{ €/kg} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Sale un precio muy elevado por el mismo motivo que en la alternativa anterior. Aunque cabe destacar que los compuestos antioxidantes tienen un valor añadido. Además,

Uno de los compuestos antioxidantes que se obtiene del bagazo es el ácido ferúlico, el cual tiene un precio aproximado de entre 2.950 hasta 4.650 €/kg dependiendo del proceso de obtención de estos.

REFERENCIAS

- [1] Guido, LF y Moreira, MM (2017). Técnicas para la extracción de polifenoles de grano usado de cervecería: una revisión. *Tecnología de alimentos y bioprocesos*, 10 (7), 1192-1209.
- [2] Trabajo fin de grado: Aprovechamiento de los subproductos generados en la industria cervecera. Sandra Esteban Torrente.
- [3] Trabajo fin de grado: Estudio y análisis de viabilidad para la implantación de una fábrica de cerveza en Cataluña. Joan Solanelles Martí, Carlos Rodríguez Nogal.
- [4] Trabajo fin de grado: Diseño del proceso industrial para la elaboración de cerveza. Mauro Gisbert Verdú.
- [5] El lúpulo en la cerveza: qué es y qué aporta este ingrediente (mayo de 2022). Nombre del sitio web: <https://www.rentabilizar.es/lupulo-la-flor-mas-cervecera>
- [6] Cerveza Ale y cerveza Lager: ¿Qué son y qué las diferencia? (mayo de 2022). Nombre del sitio web: <https://tresjotasbeerclub.com/ales-y-lagers/>
- [7] Real Decreto 678/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba la norma de calidad de la cerveza y de las bebidas de malta. (mayo de 2022). Nombre del sitio web: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2016/12/16/678>
- [8] Proceso de molienda de malta para cerveza. El blog del cervecero. (mayo de 2022). Nombre del sitio web: <https://www.verema.com/blog/el-blog-del-cervecero/1000485-proceso-molienda-malta-para-cerveza>
- [9] Residuos de cerveza alternativas para alimentar ovinos - Revista Chacra
- [10] Una segunda vida para el bagazo - Cerveza Isla Verde
- [11] Tratamiento de aguas residuales y emisiones atmosféricas. (mayo de 2022). Nombre del sitio web: <https://condorchem.com/es/>
- [12] Trabajo final integrador: Generación de biogás a partir de subproductos y efluentes líquidos de la industria de cerveza artesanal mediante digestión anaerobia. Facundo E. Koss.
- [13] Fases de la digestión anaerobia. (junio de 2022). Nombre del sitio web: <https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>
- [14] Folleto informativo amoniaco. (junio de 2022) Nombre de sitio web: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3310sp.pdf
- [15] Trabajo fin de grado. Estudio de viabilidad técnica y económica de una planta de biometanización con cogeneración. Autor: Ricardo Cañavate Moliné. Universidad de Zaragoza
- [16] Digestión Anaerobia En Vía Seca – Diseño De Tratamiento de Fangos Generados en Estación Depuradora De Aguas Residuales. Mendoza Pacheco César Antonio
- [17] Obaya, Ma. Cristina y Lorenzo, Yaniris (2006). La digestión anaerobia y los reactores UASB. Generalidades. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XL (1),13-21. ISSN: 0138-6204.

- [18] Trabajo fin de grado: obtención de compuestos antioxidantes a partir de bagazo de cerveza. Leire Nieto Sanz.
- [19] Valencia-Avilés, E., Ignacio-Figueroa, I., Sosa-Martínez, E., Bartolomé-Camacho, M. C., Martínez-Flores, H. E., & García-Pérez, M. E. (2017). Polifenoles: propiedades antioxidantes y toxicológicas. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, (16), 15-29.
- [20] Meneses, NG, Martins, S., Teixeira, JA y Mussatto, SI (2013). Influencia de los solventes de extracción en la recuperación de compuestos fenólicos antioxidantes a partir de granos usados de cervecería. *Tecnología de separación y purificación* , 108 , 152-158.
- [21] Mussatto, SI, Dragone, G. y Roberto, IC (2007). Extracción de ácidos ferúlico y p-cumárico por hidrólisis alcalina de bagazo de cerveza. *Cultivos y productos industriales* , 25 (2), 231-237.
- [22] Determinación del contenido graso de leche en polvo: extracción soxhlet. Técnicas avanzadas en química. Universidad Pablo de Olavide.
- [23] Moreira, M. M., Morais, S., Barros, A. A., Delerue-Matos, C., & Guido, L. F. (2012). A novel application of microwave-assisted extraction of polyphenols from brewer's spent grain with HPLC-DAD-MS analysis. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 403(4), 1019–1029.
- [24]] Trabajo fin de máster: Extracción de compuestos fenólicos mediante el uso de disolventes orgánicos a partir del subproducto obtenido en la elaboración de aceite de oliva virgen (alperujo). Sergio Andrés Arenas Nemogá.
- [25] Patricia Pérez-Larrán, Beatriz Díaz-Reinoso, Andrés Moure, José Luis Alonso, Herminia Domínguez, Adsorption technologies to recover and concentrate food polyphenols, *Current Opinion in Food Science*, Volume 23, 2018, Pages 165-172.
- [26] Apuntes asignatura Reactores Heterogéneos
- [27] Miguel-Gallo, Y.; Rodríguez Rico, I.L.; Prieto García, J.O. “Influencia del pH y la temperatura en la adsorción de fenol en agua utilizando ceniza de bagazo de caña de azúcar”. Afinidad. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*, [online], 2017, Vol. 74, Num. 579
- [28] Soto, ML, Moure, A., Domínguez, H., & Parajó, JC (2011). Recuperación, concentración y purificación de compuestos fenólicos por adsorción: Una revisión. *Diario de Ingeniería de Alimentos* , 105 (1), 1-27.
- [29] Carbón activado: adsorción. Desotec. (junio 2022) Nombre sitio web: [https://www.desotec.com/es/carbonologia/casos/qu-es-el-carb-n-activado#:~:text=El%20carb%C3%B3n%20activado%20es%20un,%2C%20\(apoyo%20a%20la\)%20cat%C3%A1lisis](https://www.desotec.com/es/carbonologia/casos/qu-es-el-carb-n-activado#:~:text=El%20carb%C3%B3n%20activado%20es%20un,%2C%20(apoyo%20a%20la)%20cat%C3%A1lisis)
- [30] Zeolitas, aluminosilicatos cristalinos microporosos. (junio 2022) Nombre de sitio web: <https://www.sercalia.com/zeolitanatural/#:~:text=La%20Zeolita%20natural%20es%20un%20grupo%20de%20minerales%20que%20pertenecen,cationes%20rellenando%20as%C3%AD%20los%20microporos>
- [31] Zeolitas por Editor Geoxnet. (junio 2022) Nombre de sitio web: <https://post.geoxnet.com/zeolitas/#:~:text=ESTRUCTURA%20F%C3%8DSICO%20QU%C3%8DMICA&text=Las%20zeolitas%20est%C3%A1n%20compuestas%20por,%2C%20aunque%20el%20silicio%20predomina>
- [32] Fernández, MP, Rodríguez, JF, García, MT, De Lucas, A., & Gracia, I. (2008). Aplicación de la extracción con fluidos supercríticos a la gestión del bagazo cervecero. *Investigación química industrial y de*

ingeniería , 47 (5), 1614-1619.

[33] Calculadora de McGraw-Hill Higher. Nombre de sitio web:
<http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>

[34] Negocios económicos: Actualizaciones CEPCI 2022. Abril y marzo. Nombre de sitio web:
<https://www.chemengonline.com/2022-cepci-updates-april-prelim-and-march-final/>

[35] Negocios económicos: Actualizaciones CEPCI 2021. Septiembre y agosto. Nombre de sitio web:
<https://www.chemengonline.com/2021-cepci-updates-september-prelim-and-august-final/?printmode=1>

