

Valorización del bagazo de cerveza en el territorio canario.

Autor: Rubén León Concepción

Tutores: Laura Díaz Rodríguez y Alicia Torres Gil

Grado: INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

Centro: ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA y TECNOLOGÍA.

Universidad: LA LAGUNA

Curso: 2023/2024

Agradecimientos:

En primer lugar, me gustaría agradecer enormemente a mis tutoras Alicia y Laura por hacérmelo todo tan fácil desde el primer día y estar siempre dispuestas a echar una mano en lo que hiciera falta, sin olvidarme de dar las gracias a José Tomas Rodríguez que en nombre de la compañía Mahou-SanMiguel ha estado siempre dispuesto a ayudar con gran amabilidad.

Por otro lado, agradecer siempre a mi familia que es la que ha estado ahí desde el primer hasta el último día, a mis amigos por dar esa tan necesaria ayuda y desconexión del mundo, y también agradecer a Nerea por estar siempre ahí y ser una de las principales responsables de todo esto.

Índice

Resumen.....	V
Abstract.....	V
Índice de figuras y tablas.....	VII
1) Introducción.....	9
1.1) Contextualización de la industria cervecera.....	9
1.1.1) Historia.....	9
1.1.2) Clasificación.....	11
1.1.3) Producción.....	14
1.1.4) Economía.....	17
1.2) Descripción del proceso de fabricación de cerveza.....	19
1.3) Residuos/subproductos generados en la industria cervecera.....	26
1.4) Medioambiente y sostenibilidad.....	29
2) Objetivos.....	32
3) Metodología.....	33
3.1) Revisión bibliográfica.....	33
3.2) Evaluación de alternativas de valorización.....	33
3.3) Análisis de la viabilidad técnica.....	34
4) Resultados y discusión.....	34
4.1) Caracterización del bagazo.....	34
4.2) Datos en Canarias.....	36
4.3) Alternativas de uso.....	37
4.3.1) Alimentación.....	38
4.3.1.1) Animal.....	38
4.3.1.2) Humana.....	40

4.3.2) Producción de compost.....	41
4.3.3) Generación de biocombustible.....	43
4.3.3.1) Biogás.....	44
4.3.3.2) Butanol.....	48
4.3.4) Obtención de compuestos antioxidantes.....	52
4.3.5) Utilización como biopesticida.....	54
4.3.6) Utilización como bioadsorbente.....	56
4.4) Selección de la alternativa.....	58
Conclusiones y Recomendaciones.....	69
Conclusions and Recommendations.....	70
Bibliografía.....	73
Anexo 1.....	77

RESUMEN

La industria cervecera es una de las principales agroindustrias a nivel mundial, llegando a producirse en España 41,14 millones de hectolitros durante el año 2022. En la producción de cerveza se genera una serie de residuos, que tratados de forma correcta, pueden ser utilizados en otras industrias para elaborar productos de valor superior al subproducto de origen. El mayor de estos subproductos es el bagazo de cerveza, residuo sólido procedente de la filtración del mosto dulce, que se obtiene a partir de los procesos de cocción y maceración de cereales malteados. Estos pueden llegar a suponer un 85% de los residuos de la industria cervecera.

Existen diversas alternativas para la valorización de este subproducto, las cuales se centran en la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes. Entre ellas se estudiarán algunas como, la alimentación, generación de biocombustibles, obtención de compuestos antioxidantes, utilización como biopesticida y utilización como bioadsorbente.

Realizado el estudio de las distintas alternativas, se realiza una evaluación de la posible integración en la industria local canaria de la alternativa seleccionada (generación de biogás por digestión anaerobia), teniendo como foco principal, la sostenibilidad, la economía circular, la reutilización de recursos y la reducción de residuos.

La investigación realizada muestra las facilidades técnicas aportadas por dicha alternativa. Además, se realiza un estudio del impacto que tendría el empleo de esta sobre una de las productoras de cerveza más predominantes en Canarias, la compañía Mahou-SanMiguel, concretamente sobre su fábrica emplazada en la provincia de Santa Cruz de Tenerife, arrojando datos sobre el autoabastecimiento energético de la propia fábrica, situado entre un 50% y un 60%.

ABSTRACT

The beer industry is one of the main agroindustries worldwide, with 41.14 million hectoliters being produced in Spain during the year 2022 (Cerveceros de España, 2022). In the production of beer, a series of waste is generated, which, treated correctly, can be used in other industries to produce products of higher value than the original by-product. The largest of these byproducts is beer bagasse, a solid residue from the

filtration of sweet wort, which is obtained from the cooking and maceration processes of malted cereals. These can amount to 85% of the brewing industry's waste.

There are various alternatives for the valorization of this by-product, which focus on the search for sustainable and efficient alternatives. Among them, some will be studied, such as food, generation of biofuels, obtaining antioxidant compounds, use as a biopesticide and use of bagasse as a bioadsorbent.

Once the study of the different alternatives has been carried out, an evaluation of the possible integration in the local Canarian industry of the selected alternative (generation of biogas by anaerobic digestion) is carried out, having as its focus sustainability, the circular economy, the reuse of resources and waste reduction.

The research carried out shows the technical facilities provided by this alternative. In addition, a study is carried out on the impact that its use would have on one of the most predominant beer producers in the Canary Islands, the Mahou-SanMiguel company, specifically on its factory located in the province of Santa Cruz de Tenerife, providing data on the energy self-sufficiency of the factory itself, between 50% and 60%.biopesticide and use of bagasse as a biosorbent as well as some bagasse fractionation process that unites several of the earlier alternatives.

Once the study of the different alternatives has been conducted, an evaluation of the possible integration in the local Canarian industry will be conducted. To achieve this, it will have as its focus sustainability, the circular economy, the reuse of resources and the reduction of waste.

Índice de figuras, imágenes y tablas

Figuras:

Figura 1.1 Tipos de cerveza	11
Figura 1.2 Tipos de malta	14
Figura 1.3. Volumen de cerveza consumida al año en España entre 2008 y 2022.....	15
Figura 1.4 Producción de cerveza en Europa en millones de hectolitro.....	16
Figura 1.5 Emplazamiento de los principales centros de producción	17
Figura 1.6 Empleo generado en el sector de la cerveza	18
Figura 1.7 Evolución de la exportación de cerveza (millones de hectolitro)	18
Figura 1.8 Proceso de Maceración	21
Figura 1.9 Tina Filtro.....	21
Figura 1.10 Intercambiador de placas	24
Figura 1.11 Túnel Pasteur.....	24
Figura 1.12 Diagrama elaboración de cerveza	25
Figura 1.13 Composición la raicilla de malta	27
Figura 1.14 Situación respecto al objetivo de sostenibilidad medioambiental.....	30
Figura 1.15 Objetivos de desarrollo sostenibles. Agenda 2030	31
Figura 4.1 Composición del bagazo en base seca (I).....	35
Figura 4.2 Composición del bagazo en base seca (II).....	35
Figura 4.3 Proceso de acondicionamiento para alimentación animal.....	39
Figura 4.4 Proceso de producción de harina.....	40
Figura 4.5 Proceso de generación de compost.....	42
Figura 4.6 Proceso de generación de energía a partir de biogás.....	45
Figura 4.7 Ruta metabólica del proceso de digestión anaerobia.....	46
Figura 4.8 Proceso de producción de butanol	49

Figura 4.9 Proceso de obtención de compuesto fenólicos.....	53
Figura 4.10 Procedimiento previo para ensayos de proliferación de esporas (generación de biopesticidas).....	56
Figura 4.11 Acondicionamiento para pruebas de adsorción de iones cobre.....	57
Figura 4.12 Acondicionamiento para pruebas de adsorción de fenol.....	57
Figura 4.13 Digestión anaerobia.....	64

Tablas:

Tabla 4.1 Biogás y metano producido durante el proceso	48
Tabla 4.2 Condiciones y parámetros operacionales.....	60

1.INTRODUCCIÓN

1.1 Contextualización de la industria cervecera

La cerveza conforma junto al vino, las únicas bebidas alcohólicas que se consideran alimentos. Se entiende como cerveza al alimento resultante de la fermentación, mediante levaduras seleccionadas, de un mosto cervecero elaborado a partir de materias primas naturales. Se elabora mediante el uso de agua, levaduras seleccionadas, de un mosto procedente de malta, solo o mezclado con otros productos amiláceos transformables en azúcares por digestión enzimática, lúpulo o sus derivados y aditivos y coadyuvantes tecnológicos, sometidos a un proceso de filtración y pasteurización (Boletín Oficial del Estado, 2016).

1.1.1 Historia

El origen de la cerveza se encuentra estrechamente ligado al origen de la agricultura. Por lo tanto, hay que remontarse hasta el periodo Neolítico en donde se empezó a cultivar el campo con un cereal similar al que hoy conocemos como el trigo o la cebada. La primeras referencias históricas a la cerveza se remontan hasta hace unos 7.000 años en donde se estipula la edad de unos tarros de cerámicas que evidencian la elaboración de una bebida parecida a la que hoy en día se denomina cerveza (Secretaría de Cultura de la Nación, 2019).

Entorno al año 4.000 antes de Cristo, durante la civilización sumeria, se estima que fueron escritas las primeras recetas para la realización de cerveza, pues se han hallado diversas tablillas de arcilla con la escritura cuneiforme, en donde se habla del arte de preparar cerveza y de la gran extensión de este labor ya por aquel entonces.

Posteriormente, el reino egipcio perfeccionó el arte de la elaboración de cerveza. Los egipcios empezaron a emplear la cerveza no solo para formar parte de su dieta básica, sino con aplicaciones medicinales. Según los textos recogidos en las pirámides, en la época de los faraones se podían llegar a fabricar hasta 4 millones de litros de cerveza al año.

Ya en el siglo V después de Cristo, la cerveza empezó a ser producida en los monasterios europeos, debido a que estos eran el único sector de la población con

acceso a las materias primas, así como con el conocimiento necesario para poder leer e interpretar las recetas. Por aquel entonces, se conocía hasta tres tipos diferentes de cerveza, la primera denominada “prima melior” elaborada a base de cebada y reservada para los huéspedes distinguidos. La segunda, denominada “cervisia”, de menor graduación, hecha con avena, se destinaba al consumo interno de los frailes. Y una tercera cerveza denominada “tertia”, la cual era la más suave de todas, se ofrecía a los peregrinos y a la gente común (Secretaría de Cultura de la Nación, 2019).

Durante el Imperio de Carlomagno (finales del siglo VIII, principios del siglo IX) la cerveza vivió en Europa un aumento en su consumo y prestigio. Además, favoreció la construcción de más monasterios para la cristianización de lo que hoy es Alemania y Países Bajos. Durante su gobierno, mandó trasladar a la corte a los mejores fabricantes de cerveza. De esta forma se consideró la elaboración de cerveza, por primera vez, como un oficio.

Sobre el siglo IX se data la primera producción industrial de cerveza en St. Gallen (Suiza). Se cree que fue la primera en seguir una receta concreta y un procedimiento determinado utilizando maquinaria especializada. Otra hipótesis dice que fue Otón II, rey de Alemania e Italia y emperador del sacro Imperio Romano-Germánico entre los años 961 y 983, quien otorgó la primera licencia que se conoce para la fabricación de cerveza, esta fue a parar a la ciudad de Brujas.

Otras fechas destacadas en la historia de la cerveza serían (SdC, 2021):

- Empleo del lúpulo en la cerveza, sobre el año 1100.
- Empleo de levaduras, alrededor del siglo XV, anteriormente se empleaba la fermentación espontánea.
- Ley de pureza bávara en 1516, en donde se marca que la cerveza debe contener únicamente agua, malta, lúpulo y levadura. Además, se establece un precio para una determinada cantidad.
- Nacimiento de la cerveza tipo lager (1559).
- 1810 “primera edición” del Oktoberfest, feria más famosa del mundo dedicada a la cerveza. Actualmente se sigue celebrando en Múnich (Alemania), entre septiembre y octubre.
- Aparición del estilo “pilsen” (1842).
- En 1883 se logra aislar las cepas de levaduras de los gérmenes con la que se

encuentra.

- En 1935 se comienza a comercializar la cerveza en lata, abaratando costes y mejorando el transporte y almacenamiento.
- En la década de los 70, se inicia el movimiento “homebrewing”, es decir, se recupera la forma más tradicional de elaborar cerveza, hay un gran incremento de las microcervecías y de la elaboración artesanal que se expande mundialmente.

1.1.2 Clasificación

Los tipos de cervezas producidos hoy en día pueden ser prácticamente infinitos, debido a que una pequeña variación en cualquiera de los parámetros operacionales, en la cantidad o tipo de materias primas, o incluso en el tiempo y/o condiciones en el que se lleva a cabo la elaboración dará como resultado un tipo de cerveza distinto a cualquier otro. En la figura 1.1, se aprecia como la apariencia de distintos tipos de cerveza es notablemente diferente, siendo las que aparecen en la imagen las más estandarizadas a nivel local, como son: cerveza lager, cerveza IPA (*Indian Pale Ale*), cerveza de trigo (*Wheat Beer*), cerveza Ale o una cerveza totalmente artesanal. Por lo tanto, en este apartado se clasificarán las cervezas según aquellos parámetros que puedan llegar a influir en la producción de bagazo cervecero o en las características de este, siendo este uno de los objetivos principales del trabajo.



Figura 1.1. Tipos de cerveza (Astarte, s.f.).

En primer lugar, la principal diferencia en el bagazo final producido reside en el tipo de cereal empleado; actualmente, se encuentra enormemente estandarizado el uso de cebada como cereal cervecero, sobre todo en occidente, pero aún se conservan ciertos tipos de cerveza elaborada con malta de trigo, además de otras menos estandarizadas como el centeno o las maltas de avena.

Las cervezas de trigo son originarias de Alemania y Flandes, este tipo de cervezas son reconocidas debido a su color claro y textura turbia, definiendo así el sabor característico de estas cervezas. Las dos variedades de cervezas más reconocibles elaboradas a base de trigo son la Witbier (belga) y la Weizenbier (alemana). Existe la peculiaridad de que las cervezas belgas suelen ser más ácidas y frescas que el resto, pues para su elaboración se emplea una parte del trigo sin maltear, además de aditivos saborizantes como la naranja. Por otro lado, la cerveza alemana es conocida por ser mucho más densa, oscura y aromática, esto debido principalmente al tipo de levadura que se usará más adelante en el proceso.

Las cervezas elaboradas a base de cebada malteada poseen un sabor amargo y potente característico, además, la relación de las técnicas de fermentación y conservación son las que han permitido el desarrollo de la mayoría de las cervezas que existen hoy en todo el mundo. Así, se clasifican las cervezas de cebada en dos grandes grupos; ale y lager (serán descritas en apartados posteriores), en donde se incluye el tradicional método Pilsener de elaboración de cervezas englobado dentro de la familia lager, siendo esta la línea de cervezas más populares de Europa Central (hosteleríaUNO, s.f.).

Por otro lado, una de las clasificaciones más estandarizadas en el tipo de malta empleada para la elaboración de cerveza, reside en el tratamiento que se le da al cereal, generalmente en las malterías, o de los distintos tipos de un mismo cereal, como se puede apreciar en la figura 1.2, el tratamiento al que se ve sometido el cereal así como su variedad hacen que diferentes maltas posean notables diferencias visuales, en este caso se pasará a nombrar aquellas maltas derivadas de la cebada. Generalmente, se diferencia entre maltas bases, aquellas capaces de conllevar el 100% de una receta si se requiriere, las maltas diversas, es decir, aquellas que aportan los toques diferenciales a las recetas pero que en ningún caso componen la totalidad de la receta (generalmente menos de un 50%), y las maltas especiales, las cuales se emplean en una muy reducida cantidad (menor a un 20%), esto debido a su escasa aportación de azúcares

fermentables (Beer Sapiens, 2022).

Dentro de las maltas bases, las más reconocidas son (Beer Sapiens, 2022):

- La malta Pilsner, siendo la más clara de todas y la elección tradicional para las cervezas lager, aportando sabores a pan y miel. Esta malta cuenta con un subtipo, denominado malta Pale que aporta colores y sabores más complejos que recuerdan más al bizcocho o a las galletas.
- La malta Vienna, la cual es la base de los estilos centroeuropeos tradicionales, a las que aporta sabores profundos de panadería y frutos secos, además de un color dorado e intenso.
- La malta Múnich, característica por sus tonos ambarinos, y con un sabor muy profundo a cereal.

En cuanto a las maltas diversas, las cuales son fruto de procesos muy concretos de horneado y tostado a altas temperaturas propios de cada maltería, las más reconocibles son (Beer Sapiens, 2022):

- La malta ámbar, con una elaboración similar a la Pale pero tostada a temperaturas superiores, marcando a parte de los característicos sabores a frutos secos y biscocho de la Pale, cierto ligero amargor.
- La malta *biscuit*, tostada con algo más de calor, mostrando unas notas tostadas de avellana y toffe.
- La malta *Brown*, tostada a temperaturas no demasiado altas, pero durante un periodo de tiempo prolongado, aportando así tonos castaños y aromas a café.
- Las maltas ácidas, aportan su característico toque ácido láctico que químicamente ayuda a corregir el pH del mosto en la maceración.
- Las maltas ahumadas, tostadas en hornos de madera, al estilo tradicional, aportando toque de humo peculiares de cada maltería.

Por último, las maltas especiales usadas en su justa medida para evitar la generación de cervezas pesadas y excesivamente dulzonas, se encuentran las siguientes (Beer Sapiens, 2022):

- Las maltas cristal o caramelos, aportan aromas y sabores dulces, además de un rango amplio de colores y matices. Se suele decir que cada malta base o especial posee una malta de este tipo “hermana”, es decir, que combinan a la perfección

y su uso conjunto esta estandarizado. La producción de este tipo de maltas se realiza en lotes muy reducidos y de forma muy artesanal.

- Las maltas oscuras, tostadas a altas temperaturas perdiendo así su poder enzimático, acidificándose y siendo más astringentes, similar a lo que ocurre con los granos de café o la semilla del cacao, elaborados en procesos similares. Los principales subgrupos de esta familia son la malta chocolate y todas aquellas denominadas maltas carafa, todas estas aportando sabores de cacao y regaliz.



Figura 1.2. Tipos de malta

1.1.3 Producción

La industria cervecera fue una de las grandes perjudicadas debido a la pandemia provocada por la Covid-19, esto debido a que gran parte del volumen del negocio cervecero depende de la hostelería, la cual presentó nulo movimiento durante la pandemia. La cifras recogidas en el año 2022 suponen un gran aumento del consumo respecto a años anteriores, llegando a superar los niveles prepandemia del año 2019 en cuanto a consumo de cerveza se refiere, tal y como se muestra en la figura 1.3. La restauración, presenta una enorme mejoría aumentando un 32% respecto al año 2021 y quedándose a tan solo un 2,6% de los datos presentados en 2019. Teniendo en cuenta, que a principios de 2022 aún existían ciertas limitaciones para el consumo en barra en los establecimientos de restauración derivados de la Covid-19 se espera que el informe correspondiente al año 2023 arroje datos sobre la recuperación del sector, llegando incluso a superarse los datos prepandemia (Cerveceros de España, 2022).

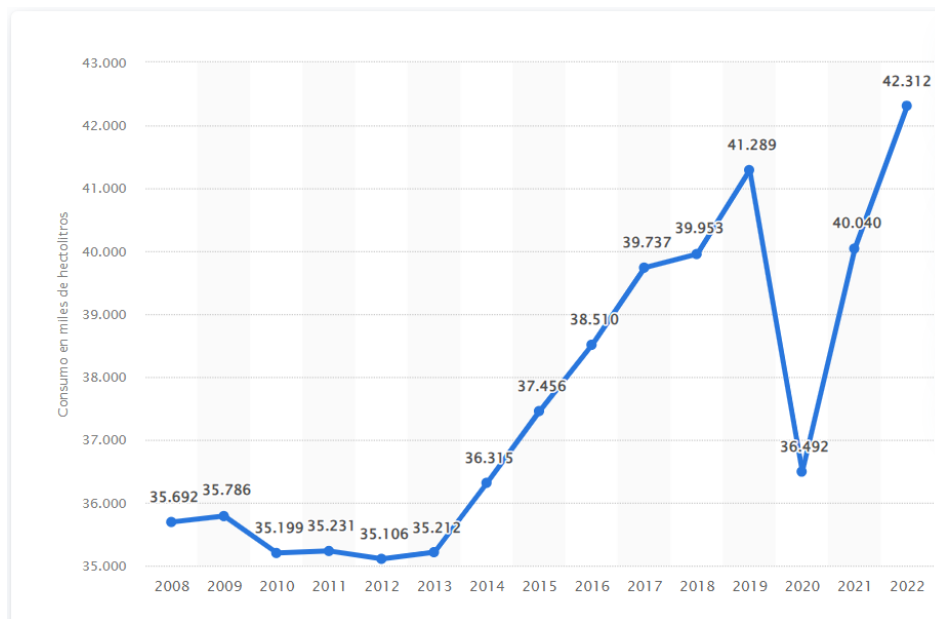


Figura 1.3. Volumen de cerveza consumida al año en España entre 2008 y 2022 (Statista, 2023).

En España, durante el año 2022 se llegó a comercializar con unos 38,95 millones de hectolitros de cerveza, llegándose a producir un total de hasta 41,1 millones de hectolitros, un 7,9% más que en el año 2021. Todo esto contando con un total de 491 industrias cerveceras inscritas en el Registro Sanitario, destacando Cataluña con un total de 110 centros, seguida de Andalucía con 72 donde, a pesar de contar con menos centros de producción se coloca a la cabeza de la elaboración de cerveza en el territorio nacional, con 8,99 millones de hectolitros durante el año 2022. En la comparativa con el resto de los países europeos, España se sitúa la segunda con mayor producción, solo por detrás de Alemania, tal como se identifica en la figura 1.4. Además, con estas cifras España se sitúa en el noveno puesto como máximo productor mundial de cerveza (Cerveceros de España, 2022). Se recoge en la figura 1.4, una comparativa de la producción de cerveza de los diferentes países de Europa, en donde se comprueba que España, a excepción de Alemania, que en este sector es una potencia mundial muy superior al resto de países europeos, es una referente europea líder en el mercado y principal referencia.

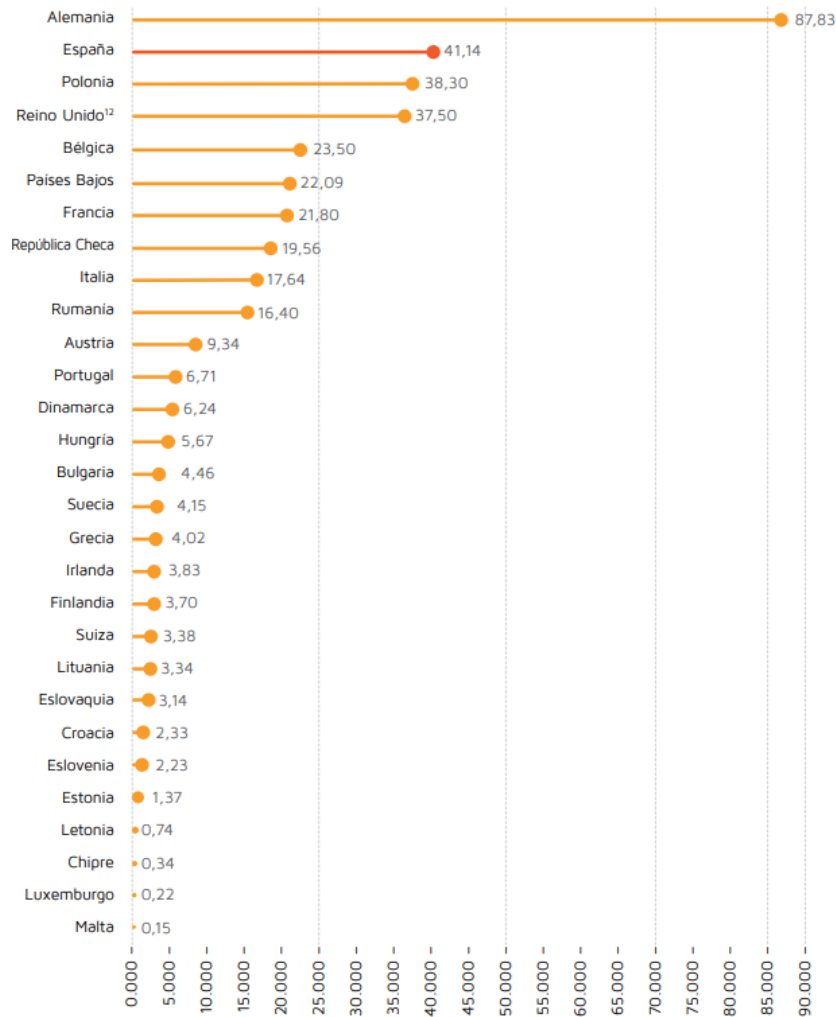


Figura 1.4. Producción de cerveza en Europa en millones de hectolitro (Cerveceros de España, 2022).

Actualmente en el territorio canario se comercializan unos 1,66 millones de hectolitros de cerveza anuales, representando el 4,3% del total comercializado en España. Las islas, durante el año 2022 han destacado enormemente debido a su exponencial crecimiento, experimentando un aumento del 17,1% de las ventas con respecto al año anterior, siendo junto a la Comunidad Valenciana, las que mayor crecimiento han obtenido. Aunque también cabe destacar, que estas cifras aún se encuentran por debajo de las recogidas en el año 2019 (anterior a la pandemia de la Covid-19) en un -0,7%, esto debido al gran decaimiento turístico que sufrieron las islas debido a la pandemia (Cerveceros de España, 2022).

Por otro lado, Canarias cuenta con tres principales centros de producción, una de ellas perteneciente a la empresa Mahou-SanMiguel (Reina 2000 SA), la principal

productora de cerveza en España, que sumando sus diferentes centros, elabora 12,81 millones de hectolitro, la cual posee un centro emplazado en la isla de Tenerife, específicamente en el polígono industrial Valle de Güímar. Por otra parte, las otras dos restantes pertenecen a la Compañía Cervecera de Canarias (Dorada y Tropical), con un centro de producción en cada una de las principales islas del archipiélago (Tenerife y Gran Canaria). Entre ambas, fabrican unos 1,07 millones de hectolitro, convirtiéndose así en la quinta potencia nacional en elaboración de cerveza. También, se cuentan con tres cerveceras locales asociadas al grupo de cerveceros de España, así como, con otros 25 centros repartidos por el territorio insular pertenecientes a cerveceras independientes. Estas son consideradas como pequeñas cerveceras, debido a que presentan una elaboración <50.000 hectolitros anuales (Cerveceros de España, 2022). En la figura 1.5, se muestra el emplazamiento de algunos de los principales centros de producción de cerveza en las Islas Canarias.



Figura 1.5. Emplazamiento de los principales centros de producción (Google maps).

1.1.4 Economía

El factor económico es fundamental cuando se habla de la importancia o el impacto que tiene un determinado sector industrial en un territorio. En el ámbito nacional la cerveza alcanza los 9.000 millones de valor añadido, llegando a generar 5.840 millones de euros en impuestos. Estas cifras actualmente continúan incrementando, puesto que superan en un 24% a las del año anterior. Además, el sector cervecero promueve la

generación de 450.000 puestos de trabajo, siendo cifras especialmente impactantes en el sector hostelero (uno de los principales sectores de la economía canaria). En la figura 1.6, se aprecia el impacto que tiene el sector cervecero sobre el mercado laboral, y como gran parte de este se centraliza en la hostelería, siendo uno de los principales nichos de negocios en el territorio canario (Instituto Nacional de Estadística, 2020).

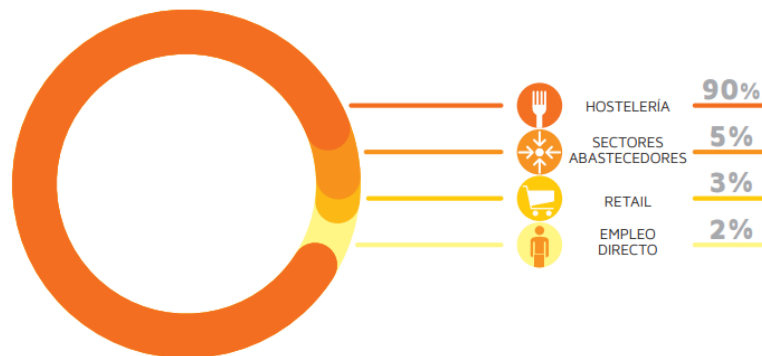


Figura 1.6. Empleo generado en el sector de la cerveza (Cerveceros de España, 2018).

En la hostelería, se comercializa con el 59% de la cerveza producida anualmente en España, esto se debe al gran aforo turístico de España, y especialmente de Canarias, y a que la mayoría de los visitantes mayores de 18 años consumen cerveza nacional durante su estancia. Esta especial afición de los turistas extranjeros es de vital redundancia en el aumento sistemático de la exportación de cerveza, tal y como se muestra en la figura 1.7, donde Canarias, debido a sus diversos atractivos turísticos, se ve especialmente beneficiada.

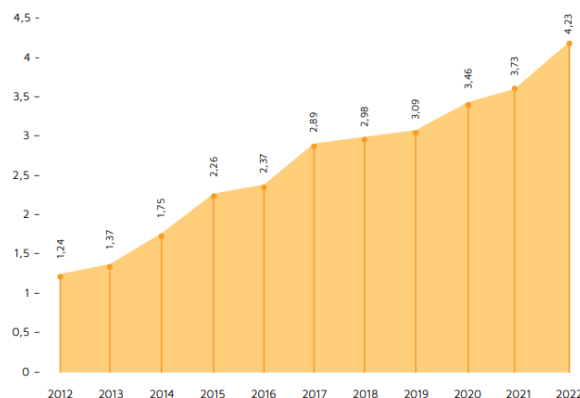


Figura 1.7. Evolución de la exportación de cerveza (millones de hectolitro) (Cerveceros de España, 2022).

1.2 Descripción del proceso de fabricación de cerveza

Los métodos y tecnologías para la elaboración de cerveza, así como la cantidad o la clase de los ingredientes seleccionados, dependen del tipo de cerveza a elaborar y del método de trabajo correspondiente en cada industria. En este apartado, se estudiará el proceso de elaboración de cerveza más estandarizado, sin tomar en consideración ningún aspecto distintivo de las propias empresas citadas anteriormente.

Para la elaboración de cerveza se emplean generalmente cuatro materias primas, entre las que se encuentran:

- 1) Agua: se trata de agua potable con composición química ligeramente mineralizada. La calidad de esta puede marcar las características de la cerveza.
- 2) Malta: sobre ella recae la configuración del cuerpo, espuma y color de cada cerveza. Ésta pasa previamente por un proceso de malteado, que consiste en la germinación controlada de un cereal (cebada o trigo principalmente), para interrumpir posteriormente este proceso secando el grano por transferencia de calor (tostado). En general, este proceso se realiza en empresas externas (malterías). España cuenta con un total de siete malterías repartidas por el territorio peninsular, que distribuyen a todas y cada una de las industrias del sector (Cerveceros de España, 2022).
- 3) Lúpulo: se trata de una planta de la familia de las Cannabiaceas oriunda, procedentes de Europa, Asia occidental y Norteamérica. Esta materia constituye lo que se conoce como el alma de la cerveza, debido a que a este ingrediente se le adjudican gran parte de los aromas, amargor y la sensación de frescor en la cerveza. Originalmente, esta planta se empleó en la elaboración de cerveza a modo de conservante e higienizante, debido a que impide el desarrollo de determinados microorganismos. España cuenta con una única distribuidora de lúpulo registrada, ubicada en la provincia de León (Cerveceros de España, 2022).
- 4) Levadura: consiste en un organismo vivo unicelular microscópico que se encarga de transformar durante el proceso de fermentación los azúcares del mosto principalmente en alcohol y dióxido de carbono (CO₂), además de otros productos. Aporta sabores, aromas, aspecto y texturas características y distintivas de cada cerveza (Mahou-San Miguel, s.f.).

El proceso de elaboración de cerveza consta generalmente de las etapas que se

describen a continuación. En este apartado no se desarrollarán procesos tales como la siembra y recogida de materias primas, así como el malteado del cereal, ya que estos procesos suelen ser independientes de la industria que elabora la cerveza (Cervecera de Canarias, 2024; Aroh, 2018). En la figura 1.12, se muestra un diagrama de flujo general del proceso de elaboración de cerveza.

- 1) Recepción y acondicionamiento de las materias primas: estas operaciones incluyen la descarga, limpieza, almacenamiento y transporte de las materias primas mencionadas anteriormente. Todo esto con la finalidad de que solo la materia prima, en óptimas condiciones sea empleada para la producción, realizando controles rigurosos de la calidad de la materia prima recibida, para asegurarse que cumple las condiciones previamente establecidas junto al distribuidor.
- 2) Molienda: este proceso recoge la malta y la tritura de forma mecánica en un molino, generalmente de rodillos, con la finalidad de separar en distintas fracciones el grano. El grano se separa en tres fracciones: la cáscara, el propio grano triturado o sémola y la sección con menor tamaño denominada harina. Esta separación proporciona la distribución deseada para la elaboración de cada tipo de cerveza, con la particularidad que las partículas de mayor tamaño (cáscara) tendrá una gran influencia en la filtración tras la extracción, debido a que esta fracción del grano actuará de lecho filtrante. Además, este proceso abre la estructura del grano de malta para que las enzimas actúen eficientemente en procesos posteriores.
- 3) Maceración: este proceso trata de una extracción sólido-líquido, es decir, es un proceso que permite separar los componentes presentes en una mezcla generalmente sólida, mediante contacto con un disolvente que disuelve selectivamente algunos de dichos componentes. En este caso el alimento será la malta procedente de la molienda, mientras que el disolvente será el agua agregada. En la figura 1.8, se aprecia el proceso de maceración una vez ambos componentes se encuentran totalmente integrados. En este proceso se busca que las enzimas degraden el almidón presente, obteniendo así una mayor concentración de azúcares solubles, que servirán de alimento para las levaduras. También, se extraen otros compuestos de interés como las proteínas.



Figura 1.8. Proceso de Maceración (Mahou-San Miguel, s.f.)

- 4) Filtrado: filtración de gruesos en donde la mezcla procedente de la maceración es bombeada a dicho proceso, donde se separan los extractos solubles del mosto (mosto dulce/fase líquida) de los componentes insolubles (bagazo/fase sólida), generalmente en un equipo denominado tina filtro, el cual se puede apreciar en la figura 1.9. Se define generalmente el mosto como un residuo fétido del zumo de la caña de azúcar. Sin embargo, en la elaboración de cerveza se emplea este término para el líquido procedente de la maceración (mosto dulce), que posteriormente se aromatiza con lúpulo (mosto amargo) para ser infusionado y posteriormente fermentado en las cubas. La principal característica del mosto es su elevado contenido en azúcares, las cuales serán metabolizadas por las levaduras para generar el alcohol de la bebida. En este proceso, se genera el residuo de interés de este trabajo, el bagazo cervecero. Este residuo, está formado principalmente por cáscara de malta, agua (humedad), así como parte de los azúcares solubles y diversos materiales no solubles.

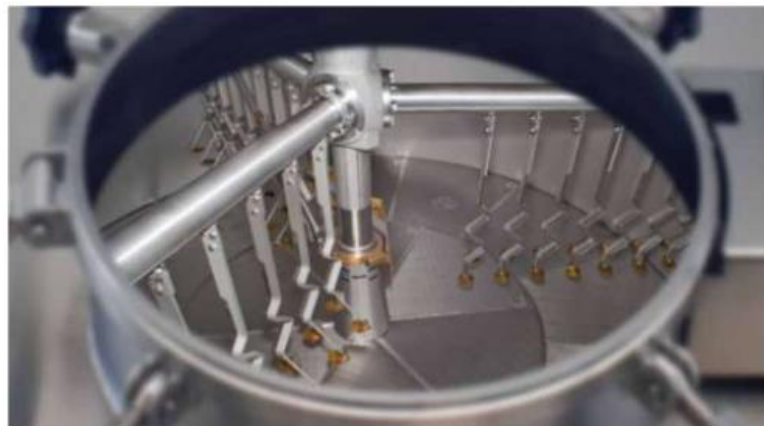


Figura 1.9. Tina filtro (Mahou-San Miguel, s.f.)

- 5) Cocción: se trata de un proceso de ebullición con la finalidad de isomerizar los amargos y la contracción de proteínas procedentes del mosto dulce, es decir, se lleva a cabo una reacción enzimática. El mosto se recoge de la filtración, el cual se transfiere a los tanques de cocción, donde se le adiciona el lúpulo. En esta etapa, actúan los componentes de este, se precipitan las proteínas y se evapora el agua. Para ello se trabaja en condiciones de temperatura adecuadas para la esterilización del mosto.
- 6) Centrifugado: se trata de un proceso de filtración fina que realiza la separación de sólidos con el empleo de fuerzas tangenciales. En esta etapa se ha estandarizado el uso de los *Whirlpool*, equipos empleados para la retirada de los componentes pesados del mosto lupulado. Se conoce como *Whirlpooling* a la técnica para la clarificación del mosto a través de fuerzas centrífugas. La palabra *Whirlpool* deriva del inglés y viene a significar torbellino, haciendo referencia a la corriente en espiral que se genera en el interior del dispositivo para su funcionamiento.
- 7) Refrigeración: el mosto extraído de la etapa anterior sigue a altas temperaturas, por lo que es necesario enfriarlo para evitar la proliferación de bacterias. Se hace pasar el mosto por un intercambiador, generalmente de placas, para reducir la temperatura hasta unos 10-20°C. Además, es importante mantener el preparado aireado durante esta etapa, para ello, se introduce aire estéril directamente al mosto para que las levaduras que van a actuar durante la fermentación recojan el oxígeno inoculado para, de esta manera, dar comienzo a la actividad metabólica.
- 8) Fermentación y maduración: se trata de un proceso de transformación bioquímica llevada a cabo en un tanque fermentador. En este, se introduce el mosto y se añade la cepa de levadura pertinente a la cerveza a elaborar. Estas pueden ser principalmente levaduras ale (levaduras de alta fermentación, que forman grumos en la superficie del tanque) o lager (levaduras de baja fermentación, se depositan en el fondo del tanque). En este proceso, los azúcares del mosto son fermentados por las levaduras, convirtiéndose principalmente en etanol y dióxido de carbono. En los mismos tanques, se puede llevar a cabo el reposo o maduración de la cerveza, mientras se va realizando la purga o recolección de levaduras para posteriores procesos de fermentación. El exceso de dióxido de carbono generado también es recuperado de los tanques, en una planta de recuperación, para ser

empleados en otros procesos como la propia carbonatación de la cerveza.

- 9) Clarificación y filtración: este proceso depende en gran medida de la ficha técnica del producto, es decir, de qué tipo de cerveza se esté elaborando, debido a que actualmente hay un gran auge de cervezas sin filtrar o con tipos de filtraciones diferente a la que podemos denominar “tradicional”. Para el caso de las cervezas filtradas, se realiza un proceso de filtración empleando filtros de placa, en donde se busca la estabilización biológica y coloidal de la cerveza, para posteriormente, hacer pasar el producto por una centrífuga retirando los restos de levadura o aditivos que hayan sido arrastrados. La clarificación se lleva a cabo generalmente con tierras diatomeas.
- 10) Envasado y taponado: el producto se conserva en tanques de prellenado en donde se miden y regulan todas las características deseadas del producto. Actualmente las principales líneas de envasado cuentan con botellas de vidrio, latas de aluminio y barriles retornables de acero inoxidable. Una vez llenos los envases (latas y botellas) se cierran inmediatamente para evitar el contacto del producto con el aire. Durante este proceso, al producto se le realizan las medidas sanitarias pertinentes dependiendo de su envase; pasteurización directa sobre el producto o *flash* (menor tiempo, por lo tanto, mayor calidad) de la cerveza; en el caso de los barriles, este proceso se realiza en un intercambiador de placas, tal y como se muestra en la figura 1.10. Por otro lado, mediante acción de túnel Pasteur (tiempo prolongado, degradación de la calidad), el cual se muestra en la figura 1.11, para latas y botellas, asegurándose de cumplir las medidas higiénico-sanitarias pertinentes. A estos procesos se les conoce como Pasteurización, es decir, un método de desinfección empleado generalmente para alimentos con la intención de reducir la presencia de agentes patógenos, en donde se realiza un proceso térmico que se basa en la aplicación de calor a altas temperaturas durante un tiempo determinado, ambos parámetros, como se ha mencionado antes, dependen especialmente del envase al que se destine el producto.



Figura 1.10. Intercambiador de placas (Mahou-San Miguel, s.f.)



Figura 1.11. Túnel Pasteur (Mahou-San Miguel, s.f.)

- 11) Paletización y almacenaje: es la zona de transición donde se desplazan los palets de envases llenos desde la línea de envasado al almacén.
- 12) Distribución: desde el almacén, se produce la salida del producto, siendo la línea de unión entre la fábrica de producción y el mercado.

En la figura 1.12 se muestra un diagrama del proceso de elaboración de cerveza.

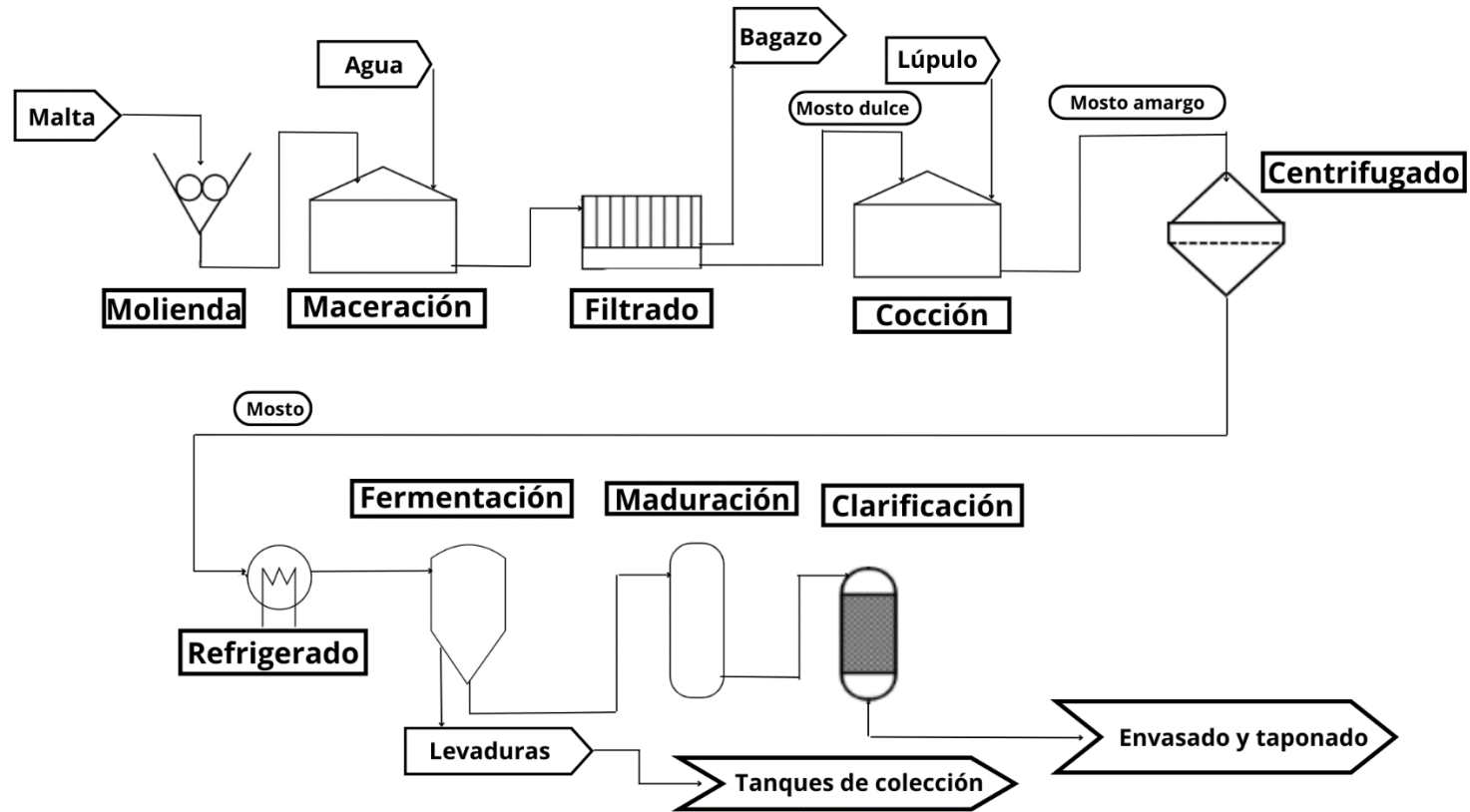


Figura 1.12. Diagrama elaboración de cerveza

1.3 Residuos/subproductos generados en la industria cervecera

Se identifica como “residuo”, a cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse (Ley 22/2011 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados). Por otro lado, la misma ley indica que “subproducto” se refiere a cualquier sustancia u objeto, resultante de un proceso de producción, cuya finalidad primaria no sea la producción de dicha sustancia u objeto. Los principales subproductos generados durante la elaboración de cerveza son: las raicillas de malta, la levadura y el bagazo.

Además, existe un cuarto residuo de interés en este proceso, que es el agua de proceso, es decir, aquella que no forma parte de los subproductos anteriormente mencionados, que salen del proceso y que han de tener un tratamiento especial acorde a la legislación establecida. A parte de la ya nombrada ley de residuos y suelos contaminados, este residuo cuenta con una serie de legislaciones extras debido a su gran importancia para la vida humana. Al no ser el objeto de este estudio, no se profundizará en los temas relacionados con el tratamiento que recibe, pero sí cabe mencionar algunas de las normas que se aplican para su manejo, especialmente aquellas que atañen en el territorio canario.

Principalmente, los aspectos relacionados con el tratamiento de residuos en Canarias son mencionados en la Ley Orgánica 1/2018, de 5 de noviembre, de reforma del Estatuto de Autonomía de Canarias. Además, el amparo legal sobre el tratamiento de aguas industriales suele recaer sobre la Ley 5/2002, de 3 de junio, sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas públicos de saneamiento. Por último, la gestión tanto de este, como de otros residuos de interés viene detallada en el Plan Nacional integral de Residuos de España (PNIR), además de venir mencionadas las leyes específicas para cada residuo que lo requiera. En este plan también se incluye los residuos domésticos y similares, los residuos con legislación específica, los suelos contaminados, además de algunos residuos agrarios e industriales no peligrosos que aunque no disponen de regulación específica, son relevantes por su cuantía y su incidencia sobre el entorno. Este plan incluye además la Estrategia de Reducción de Vertido de Residuos Biodegradables, que cumpliendo con una obligación legal, contribuye a alargar la vida de los vertederos, a disminuir su impacto sobre el entorno y de forma especial a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

Las raicillas de malta tienen como particularidad que son generadas durante el proceso de malteado, por lo tanto, como se ha explicado anteriormente, al no producirse esta parte del proceso habitualmente en la industria cervecera sino en fábricas (malterías) independientes especializadas únicamente en esta labor, pueden no contabilizarse como subproducto de la industria cervecera. Las raicillas son los brotes separados de la cebada/trigo germinada en condiciones controladas de temperatura y humedad (malteado), obteniéndose por el cribado del grano germinado. Está formada por filamentos de colores amarillentos y parduzcos con una longitud aproximada de entre 5 y 8 mm y un grosor en torno a las décimas de milímetro. Este subproducto es retirado de la cadena de producción, debido a que aportan un sabor amargo, no deseado en la elaboración de cerveza. Aproximadamente, se obtienen unos 5 kg de raicillas por cada 100 kg de cereal.

La raicilla tiene un elevado contenido en proteína bruta, alrededor del 20-28%, elevados niveles de azúcares (10-25%) y un porcentaje de almidón de entre el 28-35% entre otros compuestos en menor cantidad, tal y como se define en la figura 1.13 (FEDNA, s.f.).

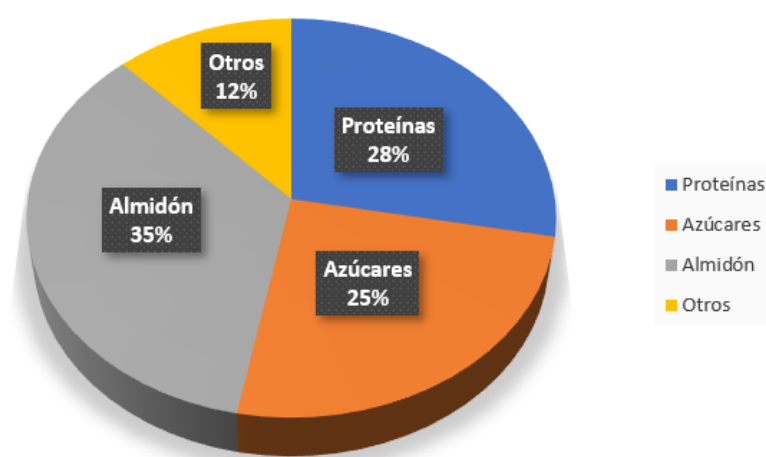


Figura 1.13. Composición la raicilla de malta

La levadura cervecera es una biomasa conformada por las células de *Saccharomyces cerevisiae*, que se recogen tras la filtración del mosto fermentado. Se trata de un subproducto con valor añadido, debido a que puede ser comercializado de diversas formas.

Al finalizar la fermentación, las levaduras son separadas generalmente mediante

decantación. Las levaduras decantadas, son recogidas y enviadas a tanques de colección en donde se conservan en las condiciones deseadas para que posteriormente puedan ser reutilizadas en sucesivos procesos de fermentación. Generalmente, una cepa de levaduras puede ser empleada por hasta 5 o 6 generaciones (procesos de fermentación). Al finalizar este último, las levaduras son recogidas mediante decantación o directamente barridas desde la superficie, dependiendo del tipo de levadura empleada, para ser retiradas del proceso. Luego, las levaduras recogidas son lavadas y se hacen pasar por centrífugas para disminuir el contenido en agua, hasta obtener un producto del 68-70% de humedad, conocido como levadura prensada, la cual, es envasada en bloques o en forma granulada en sobres para su almacenamiento bajo refrigeración.

Por otro lado, otro proceso de tratamiento para la valorización de las levaduras genera las conocidas como levaduras secas activas. Dicho proceso se emplea en el caso de que no exista una refrigeración o cuando se requieran periodos prolongados de almacenamiento. Consiste en secarlas en secadores de lecho fluidizado de atomización al vacío, obteniendo una levadura al 8% de humedad que aún puede llegar a conservar su actividad biológica (Otero et al., 2019).

Finalmente, pueden ser empleadas en la alimentación animal una vez se hayan desactivado, puesto que de lo contrario ocasionan problemas digestivos a los animales alimentados en base a esta sustancia. Por esta razón, generalmente su uso es exclusivo en la alimentación de ganado porcino, siendo esto los únicos que previa desactivación de la levadura, no ven afectada su salud por la ingesta de dicho subproducto.

El bagazo cervecero, también conocido como grano gastado de cerveza (BSG, *Brewers spent grain*), es el subproducto obtenido en la filtración del mosto dulce tras finalizar el proceso de maceración como se ha explicado anteriormente. Este residuo sólido, está compuesto principalmente por la cáscara del cereal empleado, esto sin contar su gran contenido en agua, llegando a poseer hasta un 80% de humedad, por lo que este subproducto es tratado en base seca, es decir, es tratado generalmente como un sólido. El bagazo es un material lignocelulósico compuesto principalmente por proteínas y fibras, aunque también contiene en menor cantidad lípidos y minerales (Cerisuelo & Bacha, 2021).

1.4 Medioambiente y sostenibilidad

Desde un punto de vista enfocado en la economía circular, se busca minimizar los desperdicios y maximizar la eficiencia en el uso de los recursos, promoviendo la reutilización, la reparación, el reciclaje y la regeneración de productos y materiales. Por ello, en el caso estudiado, la empresas cerveceras, buscan este pensamiento con el aprovechamiento del bagazo cervecero, además de otras diversas medidas que no son el objetivo de este trabajo, a través de la generación de diversos productos con mayor valor añadido, en donde el bagazo será empleado como la materia prima fundamental, con la finalidad de lograr una producción de cerveza más sostenible. Para ciertas industrias, como la que nos concierne, este enfoque se podría ver reflejado en un ahorro de hasta un 20% en los costes totales de producción (Ravanal, 2023).

Otro de los aspectos a tener en cuenta desde el punto de vista medioambiental, es el compromiso de las empresas del sector por adoptar una política más en concordancia con aspectos como el pacto verde europeo, cuyo objetivo es situar a la Unión Europea en el camino hacia una transición ecológica, con el objetivo último de alcanzar la neutralidad climática en 2050. Este pensamiento, se ve reflejado en el sector cervecero, en cuatro principales puntos: el uso de envases reciclables, la optimización energética, una mayor eficiencia en el empleo del agua y una reducción en el aporte a la huella de carbono generada. Para ello, la empresas del sector en España se han marcado desde 2019 una serie de objetivos sostenibles a cumplir para el año 2025. En la figura 1.14, se muestra la situación actual, con respecto a los objetivos marcados.

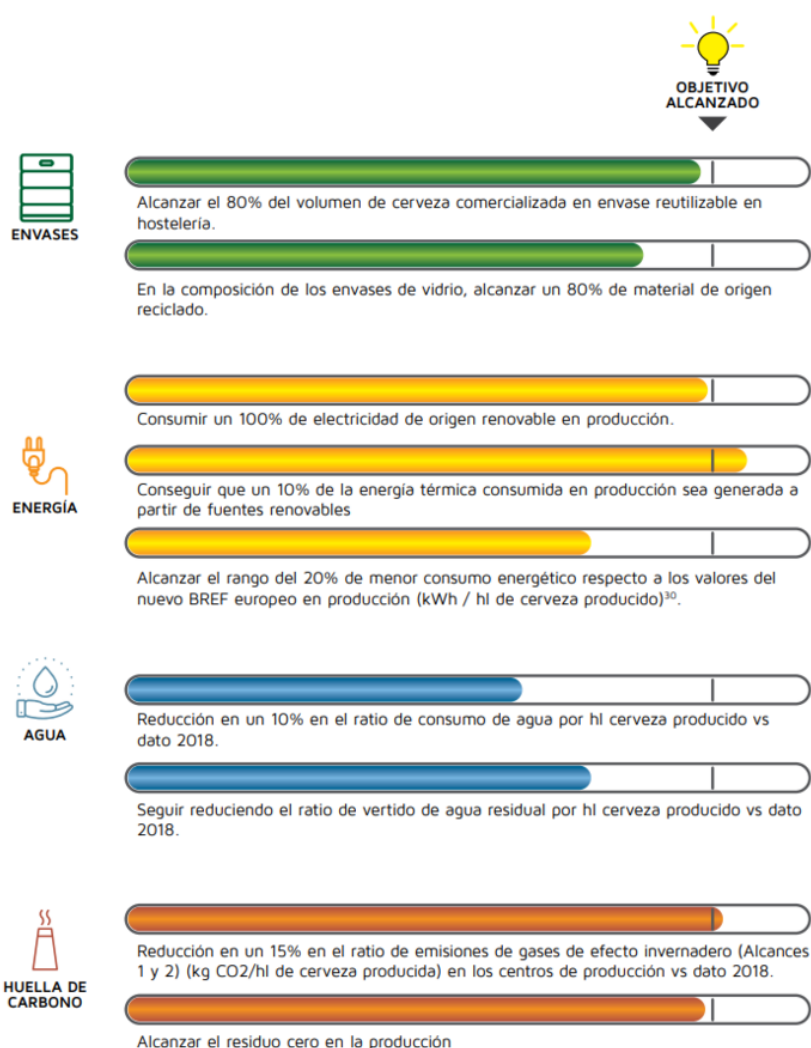


Figura 1.14. Situación respecto al objetivo de sostenibilidad medioambiental (Cerveceros de España, 2022).

En el año 2015 se establecieron una serie de objetivos de desarrollo sostenible (ODS) a nivel mundial, suscrito por hasta 193 Estados miembros de las Naciones Unidas. En particular, en este apartado se mencionan los aspectos relacionados con el sector de alimentación, bebidas y bienes de consumo. Cabe destacar que los ODS incluyen hasta 17 objetivos en diversos ámbitos, tal y como se muestra en la figura 1.15. No se entienden los ODS sin una visión global, es decir, todos y cada uno de los 17 objetivos están relacionados entre sí y cualquier empresa, particular o nación debe abarcar de la mejor manera posible todas y cada uno de los objetivos. Es por esto, que las empresas de alimentación llegan a tener una vital repercusión en cada uno de los objetivos, pero en este apartado se detallarán aquellos objetivos en donde la influencia de este sector sea mayor

o más directa (United Nations Global Compact, 2015).



Imagen 1.15. Objetivos de desarrollo sostenibles. Agenda 2030 (United Nations Global Compact, 2015).

Los ODS de mayor influencia en la alimentación, bebidas y bienes de consumo son (United Nations Global Compact, 2015):

ODS 2 – Hambre Cero: este objetivo se imparte con la finalidad de poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y una mejor nutrición y promover una agricultura sostenible. Para ello, se busca la colaboración de las grandes empresas con los agricultores aumentando la productividad, la capacidad de almacenamiento, la logística y la eficiencia del mercado. Se busca promover las soluciones innovadoras, es decir, el empleo de fertilizantes de origen natural, biopesticidas... Todo ello para abordar la seguridad alimentaria sostenible para una población mundial en crecimiento.

ODS 3 - Salud y Bienestar: objetivo que parte con la idea de garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todo. Principalmente, las empresas de alimentación tienen gran influencia en aumentar la inversión en alimentos nutraceuticos (alimentos que poseen un efecto beneficioso a la salud humana) para así abordar la resistencia a los antimicrobianos. Además, se busca la toma de medidas colectivas para eliminar

rápidamente los antibióticos para uso rutinario en la producción de alimentos.

ODS 12 – Producción y Consumo Responsable: objetivo con la finalidad de garantizar el consumo sostenible y patrones de producción. Para ello, se procura conseguir aquellos productos claves de origen sostenible, como el aceite de palma, soja, papel y celulosa y ternera. Normalizar el consumo, especialmente de frutas y vegetales, de tamaños y formas irregulares, evitando el desperdicio de todo ese alimento o su uso exclusivo como alimento para el ganado. Además, relacionado con lo anterior, se busca reducir los alimentos de desecho a lo largo de las cadenas de producción y suministro.

ODS 13 – Acción por el Clima: objetivo el cual busca adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus impactos. Especialmente, en la industria agroalimentaria se busca actuar sobre las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la agricultura, evaluando la proporción de las dietas provenientes de fuentes animales, debido a los altos niveles de producción de metano de los animales rumiantes. Por último, se intenta abogar por una agricultura fundamentada en alimentos con una mayor resiliencia al clima.

2. OBJETIVOS

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo explorar diversas vías de valorización del bagazo de cerveza en el contexto del mercado canario, identificar la más viable técnicamente y evaluar su posible integración en la industria local. A través de un enfoque interdisciplinario que combina la ingeniería química, la sostenibilidad y el análisis económico, esta investigación busca contribuir al desarrollo sostenible de la región, fomentando la reutilización de recursos y la reducción de residuos.

Por otro lado, este trabajo persigue una serie de objetivos específicos con el fin de enriquecer el estudio de todos los enfoques planteados, para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización del bagazo cervecero, centrando el estudio en los rasgos determinantes para las posibilidades de valorización estudiadas.
- Análisis de las salidas del bagazo empleadas actualmente.

- Estudio de la posibilidad de implementación de algunas de estas salidas en el mercado canario (alimentación humana, generación de biocombustibles, extracción de antioxidantes).
- Análisis de nuevas posibilidades de valorización del bagazo (biopesticidas y bioadsorbente).
- Estudio de la viabilidad técnica de la alternativa seleccionada.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo se estructura en tres etapas principales: revisión bibliográfica de la literatura referida a la industria cervecera y en especial al tratamiento de los subproductos en este sector, evaluación de alternativas de valorización del bagazo cervecero y análisis de viabilidad técnica.

3.1 Revisión bibliográfica

Se lleva a cabo una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con la industria cervecera, específicamente centrada en el subproducto del bagazo. Se utilizan fuentes como la cooperativa de Cerveceros de España y el Instituto Nacional de Estadística para obtener datos relevantes sobre la producción de cerveza y la generación de bagazo en el contexto español. Además, se consulta una variedad de bases de datos científicas, como Scielo y Science Direct, utilizando términos clave como “cerveza/beer”, “bagazo/bagasse”, “subproducto cervecero/ beer byproduct”, “BSG, *Brewers spent grain*”. Esta fase también incluye la revisión de libros de texto y proyectos relacionados con el tema, disponibles en línea, así como la legislación aplicable para obtener una perspectiva integral sobre el estado actual del conocimiento en este campo.

3.2 Evaluación de alternativas de valorización

Cada posible alternativa para la valorización del bagazo se analiza individualmente. Se describe detalladamente cada proceso propuesto, explicando sus ventajas y limitaciones. Además, se explica una posible salida en aquellas alternativas que posean actualmente una

vía estandarizada de aprovechamiento en el mercado, estudiando el impacto económico de dicha salida.

3.3 Análisis de la viabilidad técnica

Por último, se escoge una de las alternativas anteriormente estudiadas, teniendo en cuenta especialmente la viabilidad técnica del proceso descrito, así como, el impacto económico que dicha alternativa puede llegar a acometer en el mercado. Finalmente, se estudia la posible incursión en el mercado canario, concretamente, con el estudio de la salida del bagazo cervecero de la compañía Mahou-SanMiguel emplazada en la provincia de Santa Cruz de Tenerife.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización del Bagazo

El bagazo, tal y como se muestra en la figura 4.1, tiene una composición aproximada de un 15-28% 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%. Pueden contener en pequeña proporción minerales, tales como calcio, fósforo y selenio, además de compuestos fenólicos (Rachwal, 2020). Los resultados arrojados sobre la composición del bagazo han sido hallados en la búsqueda de materiales lignocelulósicos para la posible viabilidad de algunas de las alternativas que se plantearán más adelante (alimentación, biocombustibles...).

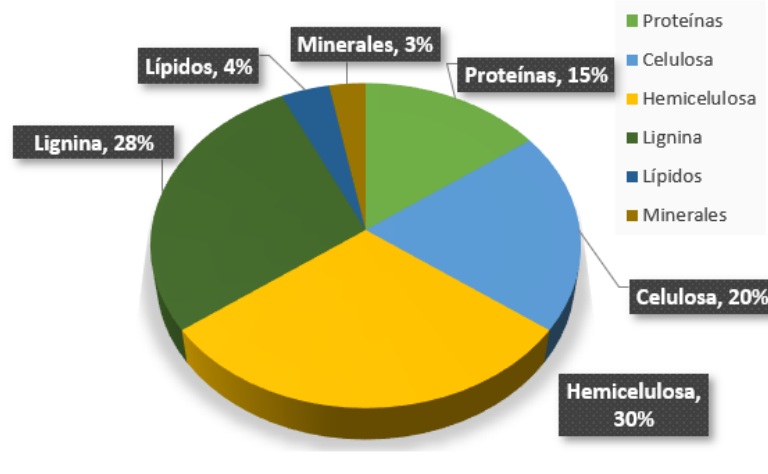


Figura 4.1. Composición del bagazo en base seca (I)

Por otro lado, en el resto de las alternativas a estudiar, es de mayor interés otros parámetros, como puede ser el contenido de extractos libres de nitrógenos entre otros, por lo tanto, un segundo resultado en la composición del bagazo cervecero (en la bibliografía pertinente referido como heces) arrojaría la siguiente composición, como se muestra en la figura 4.2: 28% de proteínas, alrededor de un 8,2% de grasas, hasta un 41% de extractos libres de nitrógeno, 17,5% celulosa y 5,3% de minerales (Kunze, 2000).

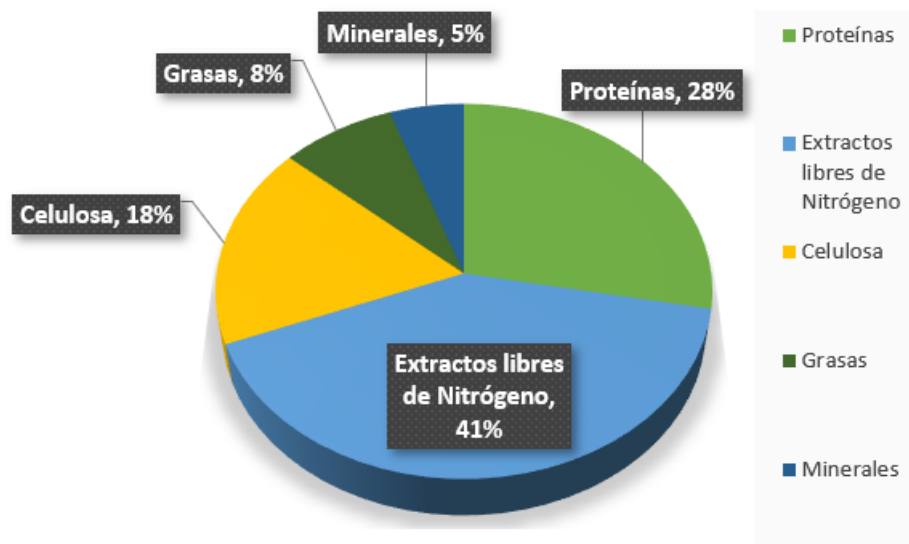


Figura 4.2. Composición del bagazo en base seca (II)

4.2 Datos en Canarias

Actualmente, en Canarias se elaboran unos 1,66 millones de hectolitros de cerveza, según datos aportados en el informe socioeconómico de la agrupación Cerveceros de España en su informe del año 2022, en donde se estipula una generación de bagazo cervecero de unos 20 kilogramos por cada 100 litros de cerveza obtenidos. Con estos datos, se puede estimar que la producción de dicho residuo en Canarias es de unos 33.200 toneladas de bagazo anualmente. Este dato es una estimación que se suele realizar en el sector cervecero, pero este se encuentra sujeto a continuas fluctuaciones debido a la evolución de la tecnología empleada en los equipos de producción de cerveza, del tipo de malta emplea, etc. Para la redacción de este trabajo se ha contado con la ayuda de la compañía Mahou-SanMiguel, la cual ha aportado los datos necesarios para los cálculos estimativos desarrollados durante el proyecto, por un lado situando que la producción de bagazo por cada 100 litros de cerveza para su compañía actualmente es de unos 17,6 kg, aunque señalando que este valor fluctúa prácticamente cada año, por lo tanto, se modificarán los datos anteriormente obtenidos para el apartado “4.4 Selección de la alternativa”, con la finalidad de que los resultados obtenidos sean lo más cercano a la realidad de la industria Canaria. El bagazo producido durante la elaboración de cerveza representa un 85% en peso del total de los residuos sólidos producidos durante el proceso. Este producto tiene un principal inconveniente para su reutilización, pues se recoge con un porcentaje de humedad en torno al 80% siendo este valor superior a lo necesario para varios de los métodos desarrollados para su valorización. Es por esto, que su reutilización conlleva un proceso previo de prensado, generalmente realizado por la empresa que se encarga de recoger y distribuir dicho subproducto de la empresa cervecera, reduciendo su humedad hasta el 60% aumentando así su periodo de conservación. El agua procedente de este proceso es recogida y puede ser empleada para enriquecer el agua de riego, generando un purín vegetal, es decir, se ha demostrado que esta agua enriquecida tiene propiedades fungicidas y activadoras del suelo (Cervecera de Canarias, 2018). Esta agua recogida junto al agua excedente del proceso de elaboración de cerveza es recogida por empresas intermediarias, las cuales se encargan de darle una salida al mercado, tal y como ya se ha explicado, además, se ha de tener en cuenta que el agua como residuo industrial está sujeta a una serie de normas y restricciones en la normativa vigente nombrada en apartados anteriores.

El empleo de este subproducto en la región, es similar en todas las grandes compañías ya mencionadas, en este caso se tomará el ejemplo de la fábrica de la Compañía de Cerveza de Canarias situada en Santa Cruz de Tenerife, ya que se cuenta con un artículo en el que se trata en concreto este tema. Dicha fábrica genera del orden de 8.000 toneladas de bagazo anuales, los cuales son distribuidos por parte de la entidad Serviagroc, un grupo que combina el cultivo de agricultura ecológica con el mantenimiento de numerosas cabezas de ganado. Esta gestión no implica gasto alguno a la empresa cervecera, ya que estos corren a cargo del distribuidor, es decir, la empresa cervecera entrega de forma gratuita este residuo a la empresa distribuidora, deshaciéndose de esta manera de todo el residuo generado (Cervecera de Canarias, 2018).

Por todo esto, este subproducto tiene dos principales salidas en el mercado canario. La primera de ellas es la alimentación animal, representando en las islas un tercio de la alimentación total del ganado. Este proceso, se basa en el prensado previo del bagazo cervecero así como su posterior mezcla con salvado (cáscara procedente de ciertos cereales que es separada por un proceso de molienda y empleada como fuente de fibra) (Cervecera de Canarias, 2018).

Otro uso que se le da a este subproducto en Canarias es la elaboración de compost. En este caso, el bagazo llega a representar el 20% del compost generado. Este proceso, requiere de una fermentación de la mezcla a no más 70°C, para evitar carbonizar la materia orgánica, en un periodo que oscila entre los tres y seis meses. El resultado de dicho proceso es un compost de origen vegetal con un 70% de materia orgánica, que por sus características, normalmente es destinado a árboles frutales especialmente, tratándose de lo conocido como un compost joven. A partir de esta medida, se ha investigado en la práctica de otras alternativas para el compost generado, llegando a emplearse como sustrato para la cubierta de azoteas y jardineras, en donde este recurso es mezclado con picón y fibra de coco para su posterior utilización (Cervecera de Canarias, 2018).

4.3 Alternativas de uso

Las alternativas de uso de este residuo que se evalúan, corresponden a aquellas que tienen como principal objetivo la sostenibilidad de la industria, así como un enfoque basado en

la economía circular. Por esto, se comentarán medidas tales como:

- Alimentación: es la medida más empleada actualmente por las empresas canarias. Por tanto, se parte de esta base en busca de una posible alternativa, especialmente desde un enfoque económico, pasando por la perspectiva medioambiental y de sostenibilidad.
- Producción de compost: es la medida que actualmente se combina con la alimentación del ganado por parte de las empresas del sector en Canarias.
- Generación de biocombustible: es de las alternativas más estudiadas y empleadas fuera del territorio canario, por lo que cobra gran importancia el estudio de su posible incorporación al mercado de las islas.
- Obtención de compuestos antioxidantes: es de las alternativas más desconocidas, la cual busca reemplazar los compuestos antioxidantes sintéticos que se emplean mayoritariamente en la actualidad.
- Utilización como biopesticida: se trata de un área que está en auge. Diversos estudios realizados, buscan la reutilización de los residuos de la industria agroalimentaria por esta vía. Estos estudios serán desarrollados en posteriores apartados, los cuales incluye el estudio realizado por Sala et al. (2021) con respecto a la inoculación de diversos hongos en base al residuo estudiado.
- Utilización como bioadsorbente: es una de las alternativas con menor complejidad industrial, y que debido al aumento de la necesidad del tratamiento de contaminantes de efluentes tanto domésticos como industriales, cobra especial relevancia.

4.3.1 Alimentación

4.3.1.1 Animal

La alimentación animal es la principal vía de valorización el bagazo cervecero por parte de las industrias del sector, especialmente en Canarias. En este caso, se plantean posibles mejoras del proceso (mostrado en la figura 4.3) y la viabilidad para su implementación. Específicamente, se mencionan dos posibles alternativas de mejora. En la primera de ellas, se busca la mejora del rendimiento del subproducto a través de un proceso de prensado con la finalidad de reducir la humedad de este. Por otro lado, la siguiente alternativa, se

centra en la prolongación de la vida útil del subproducto a través del proceso de ensilado.

El primero de los aspectos que se pueden mejorar derivado del prensado del bagazo cervicero influye en un gran número de alternativas de valorización, que se plantearán posteriormente. Por lo tanto, la implementación de este proceso puede llevarse a cabo por parte de la empresa distribuidora interesada en unas características específicas de su materia prima. Esta medida busca la mejora en el rendimiento de secado, implementado la utilización de hornos rotativos que puedan bajar la humedad hasta el 40%. La implementación de esta mejora conllevaría una mejora en la calidad del producto final y, por lo tanto, el producto finalmente generado puede ser comercializado a un precio mayor por parte de la distribuidora (Pacheco, 2022).

Para la segunda mejora, se ha de tener en cuenta que generalmente el tiempo de conservación del bagazo es muy limitado, afectando así su posible empleo como alimento ganadero. Normalmente, se recomienda su consumo como máximo entre 24/48 horas tras su obtención, lo que limita enormemente las posibilidades de transporte y reparto. Para la mejora en la conservación del producto, se realiza un proceso denominado ensilado. El ensilado es un proceso de preservación de materias vegetales mediante acidificación, este se basa en la fermentación láctica espontánea en condiciones anaeróbicas, lo cual impide la viabilidad de la actividad microbiana indeseada. Es decir, las bacterias fermentan los carbohidratos hidrosolubles produciendo ácido láctico principalmente, además de ácido acético en menor cantidad. Al haberse generado estos ácidos, el pH del producto se reduce a niveles que inhibe la presencia de microorganismos que pueden llegar a inducir la putrefacción del producto. Esta mejora, tiene como finalidad el preservar la materia alimentaria con un mínimo de pérdidas de materia seca y sin producir, durante el proceso, ninguna sustancia que pueda resultar tóxica para los animales (Álvarez et al., 2013).

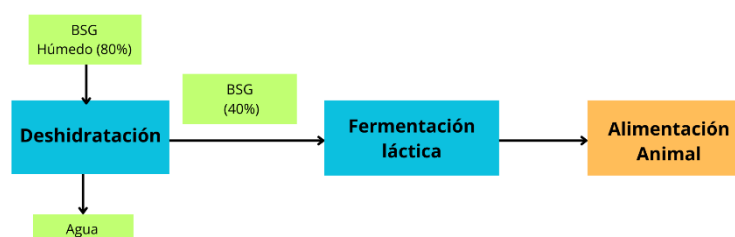


Figura 4.3. Proceso de acondicionamiento para alimentación animal

4.3.1.2 Humana

Este método se basa en la producción de harina para su uso en una gran cantidad de alimentos (pan, galletas, churros...). La harina de bagazo de cerveza surge como un sustitutivo parcial de la harina de trigo, conllevando un importante impacto tanto nutricional, debido a su gran aporte de fibras y proteínas, como económico, que se debe al bajo precio de comercialización del bagazo cervecero en comparación con otros cereales utilizados exclusivamente para la elaboración de harinas.

El proceso, como se esquematiza en la figura 4.4, comienza con el acondicionamiento del bagazo fresco, lo que incluye el pesado del producto así como un posterior prensado para la reducción de la humedad, la cual tras este proceso debe estar en torno a un 60-65% (es posible que esta parte del proceso sea realizada en la industria cervecera). Esta parte del proceso suele realizarse con el uso de una prensa hidráulica, muy estandarizada en la industria alimentaria. Luego, se procede a un secado en horno eléctrico o de gas durante, aproximadamente, cuatro horas a 65°C, para así obtener el producto con una humedad final de alrededor del 15%. Seguidamente, se procede al proceso de molienda, ya que el tamaño de partícula necesario en la generación de harinas es inferior al empleado en la industria cervecera. Finalmente, se procede a tamizar el producto resultante con un tamiz de unas 212 micras, obteniendo así harina apropiada para la panificación (Nimo & Morón, 2019).

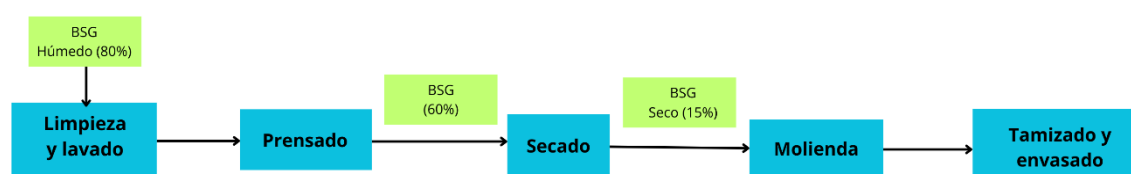


Figura 4.4. Proceso de producción de harina

El rendimiento estimado de la harina de bagazo es del 25-30% aproximadamente, lo que en Canarias podría llegar a suponer 9,96 millones de kilos de harina anualmente, lo que tendría un notable impacto económico para el sector, abaratando significativamente los costes de producción, llegando a producir un ahorro sustancial en el importe de la compra

de los canarios. Se estima que la compra de harinas y sémolas en España es de unos 2,15 kilos al año por persona, lo que en Canarias supone (teniendo 2,21 millones de habitantes según datos del Eurostat 2019) un consumo de 4,75 millones de kilos de harina anualmente, teniendo únicamente en cuenta la harina adquirida directamente por los consumidores, sin contar con las aportaciones de las harinas a otras recetas como el pan, la bollería. Por lo tanto, esta sección del mercado se puede llegar a abastecer exclusivamente con la harina procedente del bagazo de cerveza. El precio medio de las harinas y sémolas en España ronda los 1,27 €/kg, por lo tanto el volumen bruto de negocio en Canarias podría alcanzar los seis millones de euros con el mercado local, incluso aportando beneficios extras con la exportación del excedente (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2023).

4.3.2 Producción de compost

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) define el compostaje como la mezcla de materia orgánica en descomposición en condiciones aeróbicas que se emplea para mejorar la estructura del suelo y proporcionar nutrientes. Realmente, el compostaje imita la degradación natural de la materia orgánica, pero la realiza de forma más eficiente y controlada.

Esta medida, combinada con la alimentación de ganado, representa la salida del bagazo cervecero más estandarizada por parte de las cerveceras del territorio canario. Como ya se ha mencionado anteriormente, el bagazo puede llegar a suponer hasta un 20% de la composición final del compost, porcentaje que se aplica a otros componentes como la fruta y el salvado, completándose el restante 40% con restos de poda de árboles y jardines (Cervecera de Canarias, 2018).

Los beneficios principales de esta práctica son, por un lado, aportar nuevos nutrientes y movilizar los existentes en el suelo, permitiendo que se combine con las moléculas orgánicas ya existentes. Además, se aumenta la actividad microbiana y dinamiza los ciclos biológicos del suelo, favoreciendo el metabolismo de las plantas e incrementando la biomasa del terreno. Por otro lado, esta medida también mejora la capacidad de retención y almacenamiento de agua en el terreno (BBVA, 2023).

Entrando más en detalle en el proceso de producción de compost, el cual se puede observar en la figura 4.5, se describen las fases del proceso como (BBVA, 2023):

- Fase mesófila: en esta fase la materia orgánica inicia a temperatura ambiente y aumenta progresivamente debido a la actividad microbiana o por fuentes de calor externa.
- Fase termófila: se inicia cuando la materia orgánica supera los 40°C, desactivando de esta manera los microorganismos mesófilos, mientras los termófilos continúan con la descomposición del material. En esta fase se busca no superar los 70°C para evitar desencadenar reacciones químicas indeseadas que alteren la calidad del compost.
- Fase de enfriamiento: en esta fase se hace descender la temperatura hasta la temperatura ambiente. Generalmente, esto se lleva a cabo a través de dos caminos, una primera opción sería agregar más materia orgánica, homogenizarla y volver a aumentar la temperatura, o una segunda opción que sería dejar que la temperatura descienda por sí sola para comenzar la última fase.
- Fase de maduración: esta fase comienza cuando la temperatura del material llega a la temperatura ambiente, tiene como objetivo consolidar las nuevas moléculas y sumar nuevas poblaciones de organismos y microorganismos.

Un factor clave a tener en cuenta en el compostaje es la relación carbono-nitrógeno, la cual suele ser de 25 a 1 respectivamente. Además, se ha de tener en cuenta que para que las fases anteriormente descritas tengan continuidad, es importante que la mezcla permanezca húmeda y con presencia de oxígeno en el sistema para favorecer la actividad de los macroorganismos aerobios (BBVA, 2023).

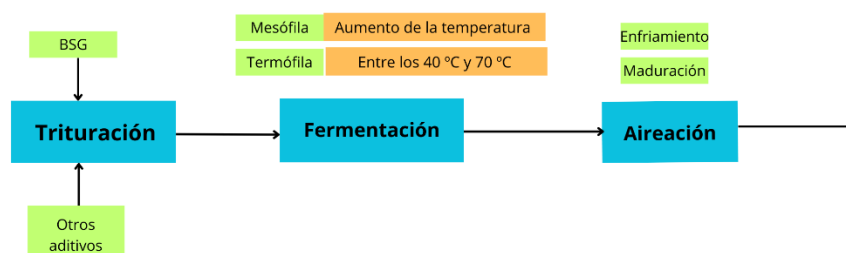


Figura 4.5. Proceso de generación de compost.

4.3.3 Generación de biocombustibles

Los biocombustibles son combustibles que se producen, directa o indirectamente, a partir de biomasa. Son químicos de alto contenido energético, estos pueden ser generados a partir de procesos biológicos, como puede ser la digestión anaerobia partiendo de derivados de la biomasa de organismos vivos (microalgas, plantas y bacterias). También, pueden ser generados por reacciones químicas de transesterificación entre otras. Esta materia se transforma en energía mediante procesos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación). A diferencia de los tradicionales combustibles fósiles (petróleo, gas natural licuado o carbón), los biocombustibles son una fuente de energía renovable. Además, se constituyen como una alternativa energética sostenible, dado que, al proceder de materia orgánica, son capaces de neutralizar el dióxido de carbono que generan durante su combustión (Saladini et al., 2016; PRIMAGAS, s.f.).

La producción de biocombustibles a partir de la biomasa puede diferenciarse según el origen de la biomasa empleada, diferenciándose así entre biocombustibles de primera, segunda o tercera generación.

Los biocombustibles de primera generación son producidos con cultivos dedicados exclusivamente a la generación de combustibles. Aunque el excedente de estos cultivos, en algunos casos, pueden ser empleados en alimentación. Estos biocombustibles son producidos a partir de aceites o azúcares comestibles provenientes de plantas como el maíz, girasol o caña de azúcar

Para el caso de segunda generación, son los producidos a partir de materias no utilizadas en alimentación, como es el caso de los residuos lignocelulósicos. En ellos, se incluyen los residuos provenientes de la actividad agroalimentaria, así como en el procesado de alimentos (biomasa descartada).

Por último, los de tercera generación, son los constituidos a partir de la biomasa cultivada en agua, como es el ejemplo de las algas. Los sistemas de cultivo de este tipo de biomasa, posee ciertas ventajas frente a los de generaciones anteriores. En este caso, se alcanzan unos rendimientos de biomasa por unidad de superficie considerablemente mayores que la de los cultivos terrestres. También, se destaca que estos sistemas pueden crecer en zonas no cultivables y pueden ser producidas empleando corrientes de agua residuales (este

proceso es empleado en diversas EDAR, estación depuradora de aguas residuales), limpiando estas aguas a la vez que se desarrollan dichas algas (Correa et al., 2017).

Este estudio se centra en los biocombustibles de segunda generación, es decir, aquellos producidos a partir de materia utilizada en la industria agroalimentaria (biomasa descartada), como son los residuos lignocelulósicos.

4.3.3.1 Biogás

El proceso de obtención de biogás ocurre a través de un proceso biológico que se da en ausencia de oxígeno, conocido como digestión anaerobia o biometanización. Parte de la materia orgánica se transforma, mediante la acción de microorganismos, en una mezcla de gases conocida como biogás. Este biogás se compone principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), presentando además pequeñas cantidades de amoníaco, hidrógeno, sulfuros, etc. La composición del biogás formado depende principalmente de la composición del sustrato formado y del diseño del sistema (Condorchem Enviro Solutions, 2022).

El biogás puede ser empleado para la generación de energía, tanto eléctrica como térmica. En la figura 4.6, se muestra un diagrama de bloques en donde se especifica el proceso a seguir desde la recogida del bagazo cervecero hasta la generación de energía pasando por la producción de biogás, así como, se identifican la salida del principal subproducto generado en el proceso.

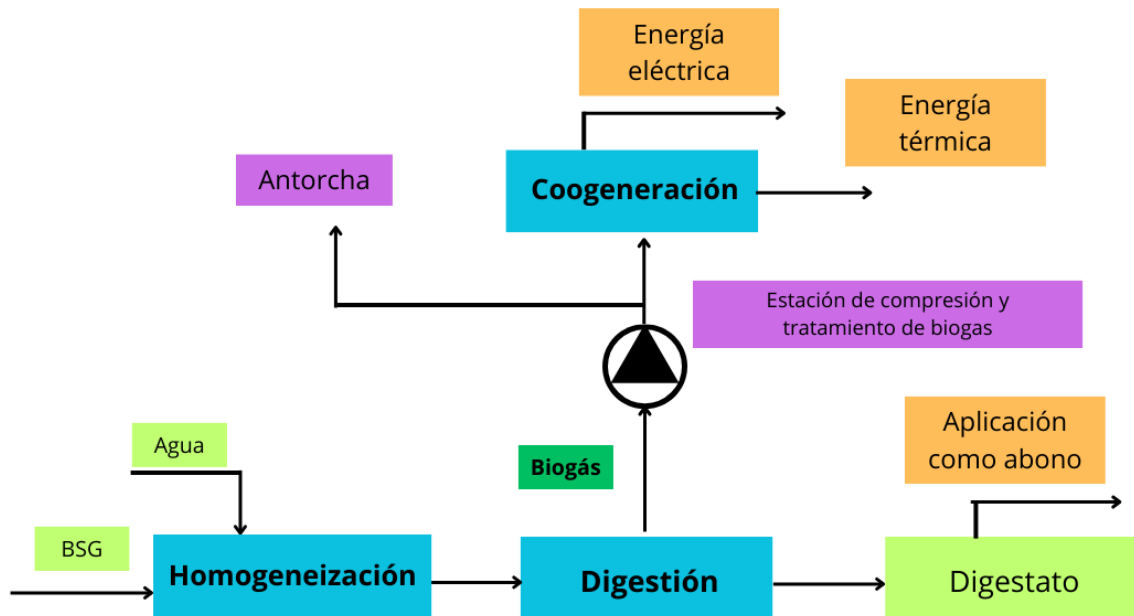


Figura 4.6. Proceso de generación de energía a partir de biogás

El bagazo cervecero es un buen sustrato para este método, ya que como se ha mencionado con anterioridad, este está compuesto principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, aunque se ha de tener en cuenta que presenta otros compuestos como fenólicos, que harán algo más complejo el proceso de degradación en condiciones anaerobias, debido a que estos compuestos son causantes de la inhibición del proceso. Así, la producción de biometano a partir de este subproducto se consigue por digestión anaerobia en dos etapas; es decir, la hidrólisis y la metanogénesis del proceso ocurrirán separadas en etapas diferentes. Debido a este motivo, la ruta metabólica que sigue el proceso se muestra en la figura 4.7:

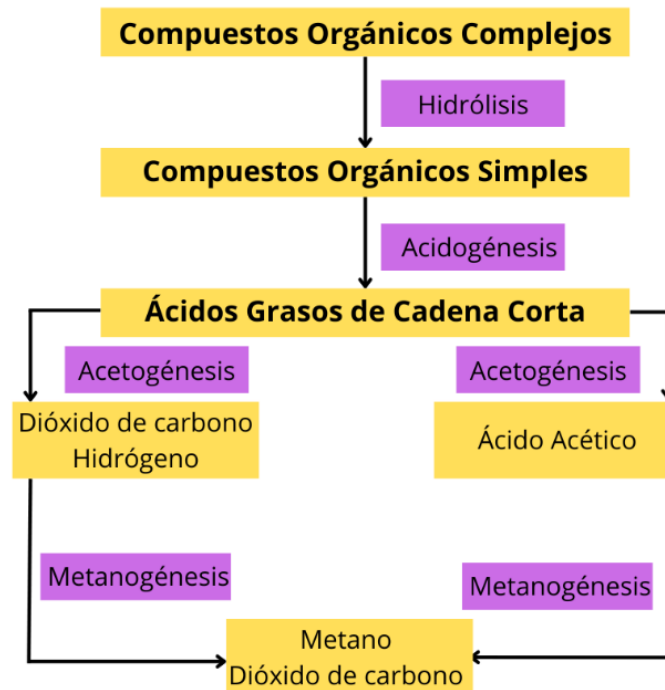
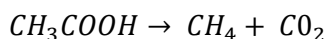


Figura 4.7. Ruta metabólica del proceso de digestión anaerobia.

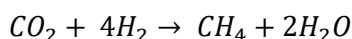
La ruta metabólica cuenta con cuatro etapas principales, y dos caminos diferenciados tal como se aprecia en la figura x. A continuación, se describen cada una de las etapas (Aqualimpia Engineering e.K., 2017):

- **Hidrólisis:** el objetivo de esta etapa se centra en la conversión de los compuestos orgánicos complejos en moléculas más sencillas, que puedan ser empleadas como fuente de energía. En este caso se hidrolizarán las proteínas, carbohidratos y lípidos procedentes del bagazo en aminoácidos, azúcares simples y ácidos grasos respectivamente. Esto se consigue a través de las enzimas extracelulares. La hidrólisis, es por tanto, la conversión de polímeros en sus respectivos monómeros.
- **Acidogénesis:** en esta fase se transforman los productos de la hidrólisis en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. La generación de estos productos dependerá de los sustratos iniciales así como de las presiones a las que se vean sometidos, las cuales, se busca mantenerlas bajas, debido a que una alta presión propiciará la generación de compuestos como el lactato y etanol, los cuales no interesan para el proceso. Todo esto, debido a que la presión parcial de hidrógeno inhibe la actividad de los microorganismos acetogénicos.

- Acetogénesis: esta etapa se encuentra marcada por las bacterias acetógenas y homoacetógenas. Las primeras de estas catabolizan ácidos orgánicos, alcoholes y compuestos aromáticos en ácido acético y dióxido de carbono; mientras que las bacterias homoacetógenas utilizan el hidrógeno y el dióxido de carbono producidos para formar ácido acético.
- Metanogénesis: en esta etapa las bacterias metanogénicas producen metano como desecho metabólico, donde el ácido acético es dividido, tal y como se detalla en la reacción 1 (70% del metano formado) mientras el hidrógeno y el dióxido de carbono se combinan para formar el metano (reacción 2).



Reacción 1. Formación de metano por división del ácido acético.



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

Según un estudio realizado por Panjicko et al. (2017), tabla 4.1, se puede aproximar la generación de biogás a unos 91,9 litros por cada kg de bagazo (pesado a la entrada del proceso, antes de entrar al tanque de homogenización). Además en el mismo estudio se recoge que el biogás presenta un rendimiento de transformación en energía de alrededor del 90 - 95%. Por otro lado, se conoce que el poder calorífico del biogás ronda los 37385 kJ/m³ de biogás, es decir, unos 10,4 kW/m³ de biogás. Como se ha nombrado en apartados anteriores, en Canarias se pueden llegar a producir un total de 33.200 toneladas de bagazo anualmente, por lo tanto, teniendo en cuenta los datos anteriores esto podría suponer una generación bruta de biogás de unos 3,05 millones de m³ anualmente, lo que supondría un aporte de 28.548 MW/año es decir unos 78,2 MW/día; este valor puede llegar a influir en la economía local convirtiéndose en una vía de apoyo para el abastecimiento eléctrico en las islas. Un posible uso de esta energía podría ser la del propio abastecimiento de la fábrica de producción de cerveza. Según los datos recogidos en la bibliografía (Panjicko et al., 2017), el consumo de energía para la elaboración de cerveza ronda los 23,6 - 33 kWh/hL considerando un valor medio de 28,3 kWh/hL se consumiría un aproximado de 46.978 MWh/año por lo tanto, la generación del biogás a partir del bagazo cervecero podría cubrir hasta el 60% de la energía consumida anualmente en Canarias para la propia

elaboración de cerveza, que en el caso de la fábrica emplazada en el polígono Valle de Güímar de la compañía Mahou-SanMiguel, de la cual se tiene datos aportados de primera mano, el consumo anual de energía asciende hasta los 3 millones de kWh, aunque sabiendo que el consumo energético aproximado por cada litro de cerveza producido ronda los 0,43 kWh, se puede estimar que canarias tiene un gasto energético anual para la producción de cerveza de unos 71.380 MWh. Para estos cálculos, hay que tener en cuenta que se emplea la generación total de bagazo en las islas, por lo tanto, no se tiene en cuenta que Canarias cuenta con la particularidad de ser un territorio fragmentado. Lo cual, encarecería los costos de producción debido a la complejidad del transporte de todo el residuo hacia un mismo punto, así como la falta de recursos para hacer llegar la energía generada a todos los puntos del archipiélago. Por tanto, estos datos se toman desde un punto de vista práctico, sin entrar en detalle, con la finalidad de tener una base para la toma de decisiones a la hora de elegir una u otra alternativa para realizar un estudio en profundidad, en donde sí se tendrán en cuenta todos los inconvenientes ya mencionados.

Tabla 4.1. Biogás y metano producido durante el proceso (Panjicko et al., 2017)

	Total biogas production			GBR		SDR		Specific biogas production			Specific methane production		
	Biogas (L)	CH ₄ (L)	CO ₂ (L)	CH ₄ (L)	CO ₂ (L)	CH ₄ (L)	CO ₂ (L)	(L/kg added)	(L/kg of TS _{added})	(L/kg of VS _{added})	(L/kg added)	(L/kg of TS _{added})	(L/kg of VS _{added})
Cycle 1	137.9	85.4	52.5	82.9	35.1	2.50	17.3	91.9	378	392	56.9	234	243
Cycle 2	103.2	58.4	44.8	46.3	20.0	12.1	24.8	98.3	408	424	55.6	231	240
Cycle 3	93.2	41.3	51.9	27.9	11.6	13.4	40.3	88.7	424	442	39.3	188	196
Cycle 4	107.1	48.5	58.6	29.0	23.2	19.5	35.4	102	396	413	46.2	179	187
Cycle 5	102.3	54.8	47.5	45.3	19.5	9.54	28.0	97.5	472	491	52.2	253	263
Cycle 6	90.4	58.3	32.1	43.3	16.9	15.0	15.2	86.1	404	423	55.5	261	273

4.3.3.2 Butanol

El butanol puede ser producido por procesos biológicos, mediante fermentación llevada a cabo por la cepa *Clostridium* en condiciones anaeróbicas. Este proceso se denomina fermentación ABE (fermentación acetona-butanol-etanol), en donde además de generarse butanol se generan otros compuestos como acetona y etanol (Bellido et al., 2014).

En la figura 4.8, se observa el proceso de obtención de butanol a partir de residuos lignocelulósicos, en este caso, a partir del bagazo de malta (BSG). A grandes rasgos, el proceso se basa en la acción de un pretratamiento para separar la parte sólida de la líquida de la materia prima. Habitualmente, el líquido obtenido en este pretratamiento es apto para

llevar a cabo una fermentación ABE. Mientras el sólido, se pasa por una etapa de hidrólisis enzimática para producir monosacáridos a partir de la celulosa y hemicelulosa, para así, poder pasar el producto (hidrolizado enzimático) de esta etapa a la fermentación. La concentración de butanol en cada ciclo de proceso es sustancialmente baja, por lo que se ha de añadir una etapa posterior de separación, que recoja el butanol existente en el medio, extrayéndose este con una alta pureza para su utilización como combustible.

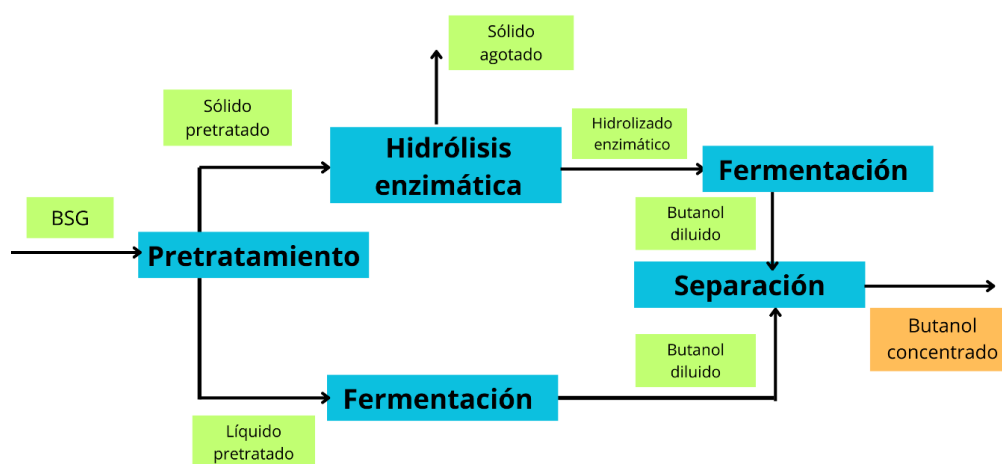


Figura 4.8. Proceso de producción de butanol.

A continuación, se describe con mayor detalle los métodos mencionados anteriormente, teniendo en cuenta que algunos de ellos ya han sido mencionados en procesos previos. En este apartado, se busca mencionar aquellos aspectos diferenciales.

- **Pretratamiento:** existe una inmensa variedad de métodos para el pretratamiento del bagazo cervecero, como los pretratamientos físicos (mecánico, por pirólisis, por microondas ...), los térmicos, los oxidantes, los biológicos, entre muchos otros, así como la combinación de varios de estos. Lo que se busca con el pretratamiento, es alterar la estructura interna del material, para que las enzimas puedan actuar posteriormente, debido a que la hidrólisis puede verse afectada por factores como la cristalinidad de la celulosa. El condicionante que marca la calidad del proceso es la disminución del tamaño de partícula y el aumento de la superficie disponible. Para esto, lo que se busca es la extracción de la hemicelulosa para así aumentar el tamaño

del poro, mejorando las condiciones para la hidrólisis. Por último se ha de tener en cuenta, que la lignina limita la velocidad y alcance de la acción de las enzimas, evitando la hidrólisis de la celulosa y la hemicelulosa (Chang & Holtzapple, 2000).

- Hidrólisis enzimática: esta etapa busca transformar las cadenas de celulosa en monosacáridos que puedan ser metabolizados por los microorganismos. La celulosa, es hidrolizada por un grupo de enzimas denominadas celulasas. Esta etapa requiere de un contacto físico entre las enzimas y el material. Las enzimas se difunden hasta la superficie de las partículas, a través de las barreras físicas como la lignina, luego, se adsorben en la superficie del sustrato, para finalmente, catalizar la hidrólisis (Chang & Holtzapple, 2000).
- Fermentación: es la etapa en la que los monosacáridos de la hidrólisis son metabolizados para producir el biocombustible. Esta fermentación se puede llevar a cabo empleando dos reactores, uno para la hidrólisis enzimática, y otro para llevar a cabo la fermentación (método SHF, sacarificación y fermentación por separado), o bien en un único reactor llevando a cabo los dos procesos de forma simultánea (método SSF, sacarificación y fermentación por simultánea). El método SHF se basa en la realización de la hidrólisis enzimática en un reactor, separar la fracción sólido de la líquida y fermentar esta última. Esto corresponde a uno de los conceptos de fermentación más tradicionales y que su mayor ventaja reside en que se trabaja en las condiciones óptimas para cada proceso. Además, el trabajar únicamente con la fracción líquida da la posibilidad de recuperar la biomasa generada durante la fermentación. Sin embargo, se ha estudiado que la eficiencia de la sacarificación se ve afectada por la inhibición de la enzima β -glucosidasa por la acumulación de glucosa, afectando finalmente el rendimiento de la producción (Niklitschek, 2010). La estrategia SSF parte de la idea de realizar la sacarificación y fermentación de forma simultánea. Esto debido al bajo rendimiento de los azúcares fermentables en la hidrólisis enzimática debido a la inhibición por producto. Este método utiliza un microorganismo capaz de asimilar la glucosa que consigue desplazar el equilibrio de la reacción permitiendo una mayor generación de azúcares simples y, por lo tanto, una cantidad final mayor de producto. Al no separar la fracción líquida de la sólida se evita la potencial pérdida de azúcares remanentes. Además, la presencia del microorganismo implica la posible degradación de compuestos tóxicos provenientes

del pretratamiento, que podrían afectar a la actividad enzimática. Finalmente, cabe destacar, que al realizar ambas etapas de manera simultánea se reduce considerablemente el uso de recursos y, por tanto, mayor rentabilidad económica (Niklitschek, 2010). El término fermentación ABE hace referencia a la generación de acetona, n-butanol y etanol a partir de los carbohidratos presentes (Dahnum et al., 2015).

- Separación: esta etapa busca la extracción del biobutanol producido durante la fermentación ABE del resto de componentes existente, realizado por algunos de los métodos disponibles en el mercado, como columnas de destilación, mediante métodos de absorción. Como se ha mencionado anteriormente, el rendimiento de producción de butanol durante la fermentación es relativamente bajo, es por esto por lo que en esta etapa se ha de buscar un método preciso que permita aprovechar al máximo el biocombustible producido, obteniéndolo con un alto grado de pureza, así como la obtención eficaz del resto de subproductos para posibles usos posteriores.

El butanol es uno de los combustibles líquidos más importantes debido a que cuenta con una alta capacidad energética, de unos 21 MJ/L, además posee otras buenas propiedades, siendo menos corrosivo que otros combustibles, poseyendo una menor presión de vapor y una menor miscibilidad en agua. El proceso anteriormente descrito es capaz de generar unos 75 g de butanol por cada kilogramo de bagazo de cerveza seco (Chang & Holtzapple, 2000). Suponiendo los ya mencionados 33,2 millones de kilogramos de bagazo producidos anualmente en Canarias, se pueden llegar a producir unos 2,5 millones de kg de biobutanol anualmente en las islas. Teniendo en cuenta la densidad de biobutanol, que ronda los 810 kg/m³, el volumen de butanol generado será de unos 3,09 millones de litros. El biobutanol tiene la particularidad de que puede ser empleado en los coches de gasolina sin necesidad de realizar ninguna modificación, por lo tanto, la comercialización de este biocombustible teniendo en cuenta que el precio medio de la gasolina en Canarias en el año 2024 ronda los 1,3 euros por cada litro, puede llegar a tener un impacto económico más que significativo, llegando a generar unos 4,02 millones de euros por la comercialización de dicho combustible.

4.3.4 Obtención de compuestos antioxidantes

Los antioxidantes son sustancias capaces de inhibir las reacciones de oxidación. Actualmente, está muy extendido el uso de antioxidantes sintéticos, por lo que esto ha derivado en un aumento del estudio de los antioxidantes naturales percibidos como la alternativa más saludable, y al provenir generalmente de residuos/subproductos de otros sectores, se cuenta con un planteamiento integral de economía circular y bienestar medioambiental. La oxidación de los lípidos (compuestos que generalmente son oxidados en los alimentos) puede provocar la propia deteriorización del alimento, así como presentar aromas rancios, variación en el color, pérdida de nutrientes y/o generación de sustancia perjudiciales.

Los compuestos antioxidantes presentes principalmente en el bagazo cervecero son los compuestos fenólicos. Estos compuestos son uno de los principales metabolitos secundarios, es decir, son los encargados del crecimiento y reproducción de las plantas. Estos, son capaces de estabilizar a los radicales libres, que son los causantes de iniciar y propagar las reacciones de oxidación, mediante el mecanismo de deslocalización electrónica. Dentro de los compuesto fenólicos existen cuatro grandes grupos: ácidos fenólicos, diterpenos fenólicos, flavonoides y aceites volátiles. De los principales grupos, los que se encuentran en mayor proporción en el bagazo cervecero son los ácidos fenólicos (ácido ferúlico y ácido p-cumárico) y los flavonoides (catequina y quercetina) (Nieto Sanz, 2019).

El proceso de extracción de compuesto fenólicos se basa en tres procedimientos claramente diferenciados (figura 4.9): un pretratamiento, una extracción y una purificación. Para realizar estos tres procedimientos existe un gran abanico de alternativas, pero en este caso se ha seleccionado la más adecuada según los diversos estudios consultados mencionados más adelante en este trabajo, teniendo como principal punto de vista la simplicidad del proceso, la viabilidad económica y la sostenibilidad medioambiental.

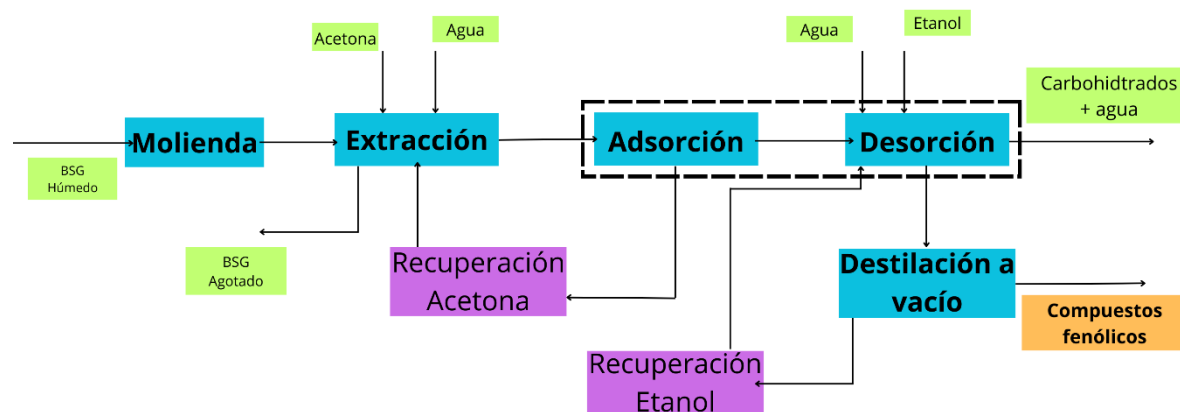


Figura 4.9. Proceso de obtención de compuesto fenólicos.

En primer lugar, el pretratamiento seleccionado es la molienda del grano de malta, teniendo este un 40-60% de humedad, de ser necesario se debería colocar un proceso previo para reducir la humedad de la materia prima hasta estos valores. Se conoce, que para una mayor eficiencia en la etapa de extracción de los compuesto fenólicos, el bagazo debe tener un diámetro de partícula de alrededor de los 0,85 mm. Esto, para aumentar el área superficial entre el disolvente y el sólido para las posteriores etapas (Fernández et al., 2008).

Por otro lado, para la extracción existen una infinidad de alternativas. En la búsqueda de maximizar la extracción se emplea una técnica convencional donde se hace uso de un disolvente. Específicamente, se emplea acetona al 60% (v/v) con una relación aproximada de 20 mL de disolvente por gramos de bagazo. El tiempo necesario para este proceso, es de unos 30 minutos a una temperatura aproximada de 60°C. Estos parámetros son establecidos para asegurarse de no dañar los compuesto fenólicos (Meneses et al., 2013).

Para la última etapa del proceso se ha seleccionado la purificación mediante adsorción en lecho fijo. En esta etapa, los compuestos fenólicos procedentes de la extracción (fase móvil) atraviesan un lecho fijo conformado por los adsorbentes requeridos (fase fija). El adsorbente mayormente empleado en estos casos es un tipo de resina no iónica. Como es propio de los procesos de adsorción, estos deben ir completados con una etapa de desorción, en donde se deben retirar los compuestos adsorbidos por la resina. Para ello, es necesario el empleo de un segundo fluido que arrastre estos compuestos, que en este caso,

se emplea una combinación de una corriente de agua para arrastrar los carbohidratos e inmediatamente después se hace pasar una corriente de etanol que extrae los compuestos fenólicos retenidos en la resina. Finalmente, se realiza una destilación a vacío para evaporar el etanol y obtener los compuesto fenólicos puros (Pérez-Larrán et al., 2018).

Según Meneses et al. (2023), la extracción de fenoles tiene un rendimiento aproximado del 61,87%, teniendo en cuenta que la composición de fenoles en el bagazo cervecero es de aproximadamente 1,6% (de los 33,2 millones de kg generados en Canarias) esto equivaldría en Canarias, a una extracción de compuestos fenólicos de 328.653,44 kg anuales. Por otro lado, también es conocido que la composición a la salida del proceso anteriormente descrito en base a los compuestos fenólicos es de 9,9 mg (Meneses et al., 2013), por cada gramo de bagazo empleado, lo que daría una producción de estos compuestos similar a la anterior, de unos 328.680 kg. El precio de los compuestos fenólicos varía en gran medida dependiendo del tipo de compuesto que sea, del proceso de extracción que se haya realizado y del destino final que se le dé al producto. Para este ejemplo se tomará el precio medio del ácido gálico (400 euros por cada kilogramo producido), uno de los compuestos más comercializados, y que por lo tanto, del que más datos se han podido contrastar. Con todos estos datos, se puede concluir que el volumen bruto de negocio para este caso rondaría los 131 millones y medio de euros anualmente.

4.3.5 Utilización como biopesticida

La valorización del bagazo cervecero como biopesticida es una de las alternativas que más se está investigando, y la cual, se cree que puede llegar a ser una de las alternativas con mayor impacto desde un punto de vista medioambiental, así como de mayor rentabilidad. Pero en este momento, pocos son los estudios que se han llevado a una escala industrial, por lo tanto, aún se desconoce el verdadero impacto que este uso puede efectuar sobre la economía del sector. Por todo esto, este apartado se enfocará desde un punto de vista teórico, en donde se explicarán las pruebas y ensayos realizadas en dos estudios en particular, un primer estudio, en donde se estudia la adición del bagazo junto a estiércol (Gandariasbeitia et al., 2021), y un segundo estudio, en donde se valora la capacidad de diferentes subproductos de la industria agroalimentaria (entre ellos el bagazo) para el crecimiento de esporas de distintos tipos de hongos.

El primer estudio, conta de un proceso que se basa en la adicción del bagazo junto a estiércol fresco en parcelas de cultivo. En este caso, se evalúa la capacidad de reducir la incidencia de enfermedades causadas por el nematodo *Meloidogyne incognita* en diferentes cultivos. Esto debido, a que el alto contenido de nitrógeno promueve la actividad de microorganismos beneficiosos para el suelo de cultivo, lo que ayuda a descomponer la materia orgánica (estiércol), y así eliminar los nematodos y otros parásitos capaces de dañar los cultivos. Se estima que la adicción de este material puede llegar a aumentar el rendimiento en las parcelas alrededor de un 15% en comparación con parcelas de control abonados exclusivamente con estiércol fresco de vaca (Gandariasbeitia et al., 2021).

El segundo método para la reutilización del bagazo de cerveza como biopesticida, es la generación de biopesticidas derivados de hongos, es decir, de la proliferación de los hongos en un terreno determinado, los cuales al inocular sus esporas al terreno generan una serie de características perjudiciales para diferentes tipos de parásitos y enfermedades típicas de diferentes cultivos. Estos biopesticidas fúngicos son producidos mediante fermentación en estado sólido (FES). En este caso, se producen esporas aéreas, conocidas como *conidias*. En el estudio de este método se añan estudios realizados con la cepa de hongos *Beauveria bassiana* (BB), el cual presenta grandes efectos en el control de plagas teniendo eficacia sobre más de 700 especies de ácaros e insectos, produciendo su infección a través de sus esporas, y del hongo conocido como *Trichoderma harzianum* (TH), el cual presenta efectos sobre diversos fitopatógenos además de presentar propiedades estimulantes del crecimiento vegetal (Sala et al., 2021).

Este método, tal y como se señala en la figura 4.10, comienza con el acondicionamiento del residuo agroalimentario, realizando en primer lugar, un ajuste de la humedad a valores adecuados de entre el 60% y el 65% con la adición de cáscara de arroz y paja de trigo, con una humedad inicial del 10%. Seguidamente, se procede con una triple esterilización en autoclave, cada una de ellas alrededor de 30 minutos a 120°C.

El estudio realizado por Sala et al. (2021) sigue el siguiente método: se realiza una prueba FES por triplicado en reactores cilíndricos de PVC de 0,5L de capacidad, herméticamente cerrados y sumergidos en un baño termostático a 25°C para garantizar que las fermentaciones se llevaban a cabo a la temperatura óptima de crecimiento de los hongos.

Se disponía en cada reactor, de entrada y salida de aire continuo a un caudal fijo de 20 mL/min. A cada reactor se añadieron 100 g del residuo a estudiar previamente inoculado en campana de flujo laminar con BB o TH. El tiempo de proceso se estableció en 7-8 días para BB y 5-6 días para TH.

El estudio mencionado abarca diversos procedimientos y métodos de análisis de distintos factores, los cuales por simplicidad no se detallarán en este trabajo. El estudio concluyó que el bagazo de cerveza ha arrojado los mejores datos con respecto al resto de sustratos estudiados (cáscara de arroz, pomaza de manzana, bagazo de whisky, fibra de soja, fibra de arroz, paja de trigo, piel de naranja y piel de papa) alcanzando un valor de proliferación de esporas para el hongo TH de unas $7,5 \cdot 10^9$ esporas. Por lo tanto, se demuestra que es viable el empleo de bagazo de cerveza como sustrato para el crecimiento y la producción de esporas mediante hongos BB y TH (Sala et al., 2021).

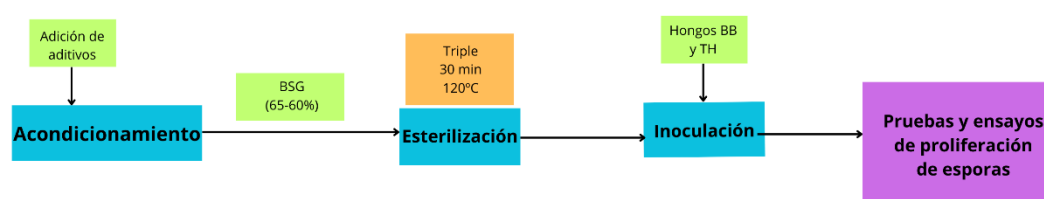


Figura 4.10. Procedimiento previo para ensayos de proliferación de esporas (generación de biopesticidas)

4.3.6 Utilización como bioadsorbente

Nuevamente, este apartado se centra en uno de los métodos más investigados actualmente, pero con escasa aplicación a gran escala. Por lo tanto, se volverá a centrar este apartado en la explicación de los métodos seguidos en diversos estudios para la caracterización de esta posible valorización.

Este apartado se centrará en comentar dos estudios ya realizados. Un primer estudio realizado en la universidad federal de São Carlos (São Paulo, Brasil) por Duque (2018) sobre la capacidad de adsorción de iones cobre, esquematizado en la figura 4.11. Por otro lado, en segundo estudio, mostrado en la figura 4.12, que fue realizado en la universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) por el autor Suárez (2022), en el que se

preparará el bagazo de malta como bioadsorbente, evaluando la capacidad de retención de fenol en efluentes líquidos.

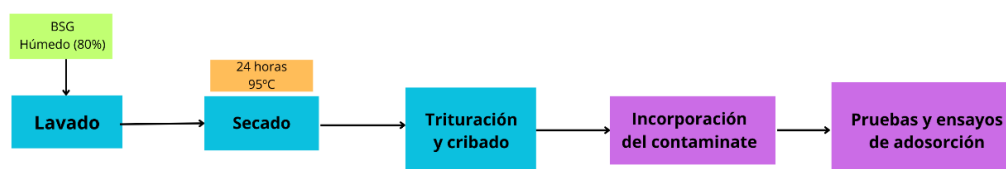


Figura 4.11. Acondicionamiento para pruebas de adsorción de iones cobre.

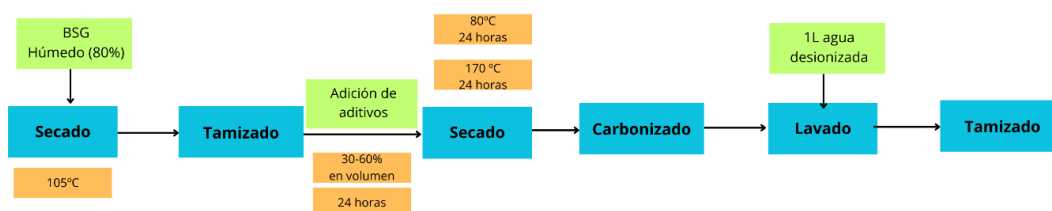


Figura 4.12. Acondicionamiento para pruebas de adsorción de fenol

El estudio realizado por Duque (2018), tal y como se puede observar en la figura 4.11, comienza con un lavado y posterior secado durante 24 horas en estufa a 95°C. Seguidamente, la muestra es triturada y cribada en hasta tres tamaños diferentes (C80, C200, C250) para así determinar la influencia del tamaño de partícula. A estas muestras se le realizaron diferentes pruebas, para evaluar la influencia, además del tamaño como ya se mencionó anteriormente, del pH y del tiempo.

Según los ensayos preliminares realizados al bagazo cervecero en este estudio, con la finalidad de caracterizar el mismo a través de microscopía electrónica de barrido (SEM), en donde se determina que la muestra empleada se trata de un material heterogéneo, que contiene formas y texturas diversas, siendo irregulares y rugosas. Debido a esta porosidad del material se prevé un buen rendimiento en prueba de adsorción en medio líquido. Por otro lado, se realiza espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), antes y después de las pruebas de adsorción en donde se concluye que los grupos funcionales presentes en el bagazo de cerveza (C-O celulosa; C=O pectina; -CH₂; O-H hidroxilo, carboxilo y grupos amino) son característicos de materiales lignocelulósicos y compatibles con la ligación de iones cobre.

Finalmente, este primer estudio determina que el tamaño de partícula es un gran influente en la capacidad de adsorción del material, viendo que a menor tamaño la mayor superficie específica obtenida aumenta el porcentaje de remoción de iones cobre. Además, que las partículas a mayor razón carbonilo:hidroxilo presentaban un mejor rendimiento. También, se determinó que a pH más ácidos mayor nivel de eliminación, así como la complejidad de un sistema natural a gran escala debido a la posible competencia entre las diversas especies presentes. Por último, se determinó que la adsorción de iones cobre en las condiciones idóneas detalladas anteriormente puede llegar a ser de hasta un 60% (Duque, 2018).

Para el segundo estudio realizado por Suárez (2022), tal y como se esquematiza en la figura 4.12, se comenzó con el secado del bagazo cervecero a unos 105°C y un posterior tamizado entre 125-150 μm . A continuación, se impregnó el material con ácido fosfórico al 30% o al 60% durante 24 horas. Posteriormente, se secó la muestra a 80°C durante 24 horas y nuevamente a 170°C otras 24 horas más. El material resultante se carbonizó a diferentes condiciones de temperatura y tiempo para estudiar el impacto de estos factores en el resultado final. Por último, el material carbonizado fue lavado con un litro de agua desionizada para eliminar el exceso de ácido fosfórico, para finalizar con un nuevo tamizado a 63 μm .

Este estudio, recogió que el carbón activado presentó una superficie específica de alrededor de 1306,23 m^2/g con grupos superficiales diversos y una capacidad de adsorción del fenol de hasta 37,29 $\text{mg}_{\text{fenol}}/\text{g}_{\text{material}}$ en el material catalogado como CB60 601, el cual se basaba en la impregnación con 60% en volumen de ácido fosfórico y secado a 600°C durante una hora. Por lo tanto, se concluyó que el bagazo cervecero puede ser una alternativa para la síntesis de carbón activado, pudiendo ser aplicado al tratamiento de aguas contaminadas con fenol (Suárez, 2022).

4.4 Selección de la alternativa

Tras haberse estudiado las diferentes alternativas anteriormente mencionadas, se decide elegir, y por lo tanto, estudiar en mayor profundidad, la valorización del bagazo cervecero a través de la generación de biogás. En el estudio previo de dicha alternativa se ha

comentado una posible salida del producto generado (generación de energía), y es de esta salida concreta de la que se realizará el estudio económico y medioambiental.

La necesidad de la búsqueda de esta valorización del residuo de la industria cervecera viene fundamentada por la precariedad de las soluciones tomadas en la actualidad ya explicadas con anterioridad. Esto debido a que Canarias ha visto reducida su actividad ganadera y agrícola en los últimos años, así como el crecimiento poblacional, a su vez, tanto de residentes como de nómadas promovidos por el turismo supone en las islas un sobre requerimiento energético.

La elección de dicha alternativa viene justificada principalmente, debido a la dependencia energética que Canarias mantiene del exterior, pues la mayor parte de la energía empleada en las islas proviene de combustibles fósiles importados desde distintos lugares. Otro de los aspectos que se han considerado para la elección de la alternativa, es la transición energética en la que se ven envueltas las islas, hacia sistemas de producción de energía más sostenibles y respetuosos con el medioambiente. Este sector se encuentra monopolizado por las energías renovables, principalmente solar, eólica o hidráulica. Estas energías, dependen en gran medida de la situación climatológica del archipiélago, por lo tanto, es una medida de la que no se puede depender en exclusividad para el abastecimiento energético, debido a su precariedad y a la falta de continuidad en la generación energética. Por todo esto, es que surgen los biocombustibles, en este caso el biogás, como una alternativa segura, fiable y con una enorme proyección para el autoabastecimiento. En este caso, se referirá exclusivamente a la generación de biogás a partir de bagazo cervecero, por lo tanto, la cantidad de energía resultante será potencialmente inferior a la posible combinación de este recursos junto con diversos residuos de la industria agroalimentaria, lo cual sería una opción para aumentar la producción energética. Se estudiará en este apartado la capacidad de autoabastecimiento de las propias industrias cerveceras mediante este recurso tal como se ha mencionado en previos apartados.

Aspectos que se han de tener en cuenta en la implementación de este sistema en el sector industrial canario es la fragmentación del terreno, pues esto deriva en unos sobrecostos que requieren un estudio con mayor profundidad del que se va a realizar. Por lo tanto, este estudio se centrará en la utilización del bagazo generado por la compañía Mahou-

SanMiguel, concretamente de su fábrica situada en la misma provincia insular, en la que han producido 3.203,2 toneladas durante el año 2023 según datos aportados por parte del personal competente de la empresa, para la redacción de este trabajo. Concretamente, dicha empresa genera 17,6 kg de bagazo por hectolitro de cerveza, en un año donde la producción ha rondado los 182.000 hectolitros de las diversas cervezas elaboradas por la compañía.

En primer lugar, para el estudio de esta alternativa se estudiará más en profundidad la digestión anaerobia, siendo esta la parte fundamental del proceso, tal y como se ha descrito en el apartado “4.3.3.1 Biogás”. Para ello, una vez ya descrito a grandes rasgos en qué consiste la digestión anaerobia, la ruta metabólica llevada a cabo durante el proceso, así como la descripción de cada una de las etapas que ocurren, se decide seleccionar las condiciones y parámetros más habituales en este proceso.

En la tabla 4.2, se presentan los parámetros más habituales para la actividad de bacterias metanogénicas con una producción de metano aceptable. Para la realización de dicha tabla se han consultado los siguientes artículos relacionados con el tema: (Aqualimpia Engineering, 2017); (Cueva, 2021); (Espitia & Ruiz, 2022); (Niklitschek, 2010); (Panjicko, et al, 2017), llegando al siguiente consenso general:

Tabla 4.2. Condiciones y parámetros operacionales

PARÁMETRO	RANGO ÓPTIMO
Alcalinidad [(g/L) CaCO ₃]	2-3
pH	4,5-7,5
Potencial redox (mV)	< -300
Temperatura psicrofílica (°C)	15-18
Temperatura mesofílica (°C)	28-33
Temperatura termofílica (°C)	50-60

El valor óptimo de pH depende en gran medida de la etapa en la que se encuentre el proceso. Se ha decidido colocar en la tabla 4.2 los límites generales del proceso, pero cabe destacar en particular que; durante la hidrólisis el pH óptimo es de entre 5,3 y 6,7, aunque considerando que estos valores se ven influenciados por el tipo de sustrato y por el tiempo de retención propio de esta etapa, este valor puede descender hasta los 4,5. Por otro lado, en la etapa de acidogénesis este valor cae alrededor de los 5,5 - 6,7 de pH, aunque este valor, por consenso general se suele situar entre los 6,0 y los 7,5 de pH. En la etapa de acetogénesis el valor del pH no es trascendental para llevar a cabo dicha fase, por lo tanto, no es común tener bajo control este parámetro, ni se suele establecer límites de estabilidad para ello. Por último, durante la metanogénesis este valor se suele situar en los 6,8 - 7,5 llegando incluso hasta valores de pH de 8,0 (Aqualimpia Engineering, 2017).

Además de los datos aportados en la tabla anterior, existe otra serie de parámetros y/o criterios a considerar para la optimización del proceso de digestión anaerobia, los cuales no se estiman mediante métodos numéricos, y su principal influencia recae en el impacto que pueden llegar a tener sobre los parámetros anteriormente mencionados (alcalinidad, pH, potencial redox y temperatura), entre estos criterios se encuentran (Espitia & Ruiz, 2022):

- **Nutrientes:** esta condición, se centra en el adecuado desarrollo de los microorganismos necesarios para la digestión anaerobia, por esto, el residuo a digerir, en este caso el bagazo, debe presentar una relación de nutrientes tal que permita el correcto crecimiento de los microorganismos que participan en el proceso. Habitualmente, los nutrientes que se han de tener en cuenta para determinar la calidad del residuo agroalimentario son tanto el nitrógeno, como el fósforo. Este parámetro se suele discernir mediante relaciones carbono/nutrientes, en este caso en particular, se suele estimar un óptimo en la relación carbono/nitrógeno de 30/1 mientras que la relación carbono/fósforo se sitúa en un valor de 150/1, teniendo especial cuidado con las relaciones por encima de este valor, debido a que valores inferiores al dado no generan problemas de inhibición en el proceso.
- **Toxicidad:** este parámetro se ha de controlar para evitar la inhibición de los microorganismos, así como su inactividad, lo cual provocaría un desajuste en la cinética de degradación. Se ha de tener especial atención en la fracción soluble de

estos compuestos, pues son los que en mayor medida pueden provocar los efectos adversos mencionados. Estos parámetros negativos se basan en la desaparición de hidrógeno o metano así como en el aumento de ácidos orgánicos volátiles. También, se ha de tener en cuenta la presencia de materiales pesados en el proceso.

- Condiciones de mezcla: con el fin de conseguir una distribución homogénea se implementa cierto grado de agitación en el biodigestor. Esta condición se lleva a cabo mediante métodos mecánicos o neumáticos, con la finalidad de conseguir una distribución uniforme de la temperatura en cada etapa del proceso (alcanzar una isoterma adecuada), también, se busca evitar la formación tanto de espumas como de sedimentos, además de lograr una buena dispersión de los desechos ingresados al reactor como los que se forman en el propio proceso.
- Tiempo de retención: este parámetro influye en la cantidad de metano a generar en el proceso, ya que es el parámetro fundamental en la conversión de sólidos volátiles a compuestos gaseoso, y más concretamente si se refiere al tiempo de retención hidráulico (TRH), el cual se encuentra especialmente ligado al caudal que va a ser tratado y por lo tanto al caudal final de biogás generado. También, se ha de tener en cuenta el tiempo que los microorganismos permanecen dentro del reactor (tiempo de retención celular (TRC)), esto con el fin de mantener una población de microorganismos adecuadas para el proceso.
- Velocidad de carga orgánica: estrechamente relacionado con el TRH, puesto que una baja velocidad de carga orgánica supone un TRH elevado. Esta condición depende en buena medida del diseño del reactor seleccionado, del tipo de tecnología empleada, así como de las condiciones y características de la biomasa a tratar. El proceso de digestión anaeróbica que se plantea se verá restringido debido a la escasa energía obtenida por las bacterias metanogénicas por la degradación de ácidos volátiles. Este hecho, provocará una tasa de crecimiento restringida, albergando una cantidad de sustrato por organismo relativamente alta.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): este parámetro establece el contenido de oxígeno necesario para poder oxidar la materia orgánica presente, operando en condiciones controladas. La DQO va disminuyendo a lo largo del proceso debido a que la cantidad de materia orgánica va disminuyendo por la influencia de los microorganismos.

Como ya se ha nombrado anteriormente, debido a las características del producto (bagazo cervecero) especialmente a su alto contenido en compuesto fenólicos (productos de degradación) causantes de la inhibición del proceso, se realizará la digestión anaerobia en un proceso de dos etapas diferenciadas (hidrólisis y metanogénesis ocurren en etapas diferentes). Además, se decide realizar la digestión en lo que se conoce como estado sólido, es decir, la materia prima del proceso ha de presentar una concentración de sólidos totales de entre un 20% y un 40%. La etapa limitante de la velocidad del proceso es la fermentación (acidogénesis y acetogénesis) ya que se trata de un material lignocelulósico en los que este proceso sucede a una velocidad notablemente baja. En la figura 4.13, se muestra el diagrama de flujo característico del proceso, teniendo en cuenta todas las condiciones expuestas anteriormente, así como las distintas partes del proceso y de la selección de la tecnología más adecuada que se detallarán posteriormente.

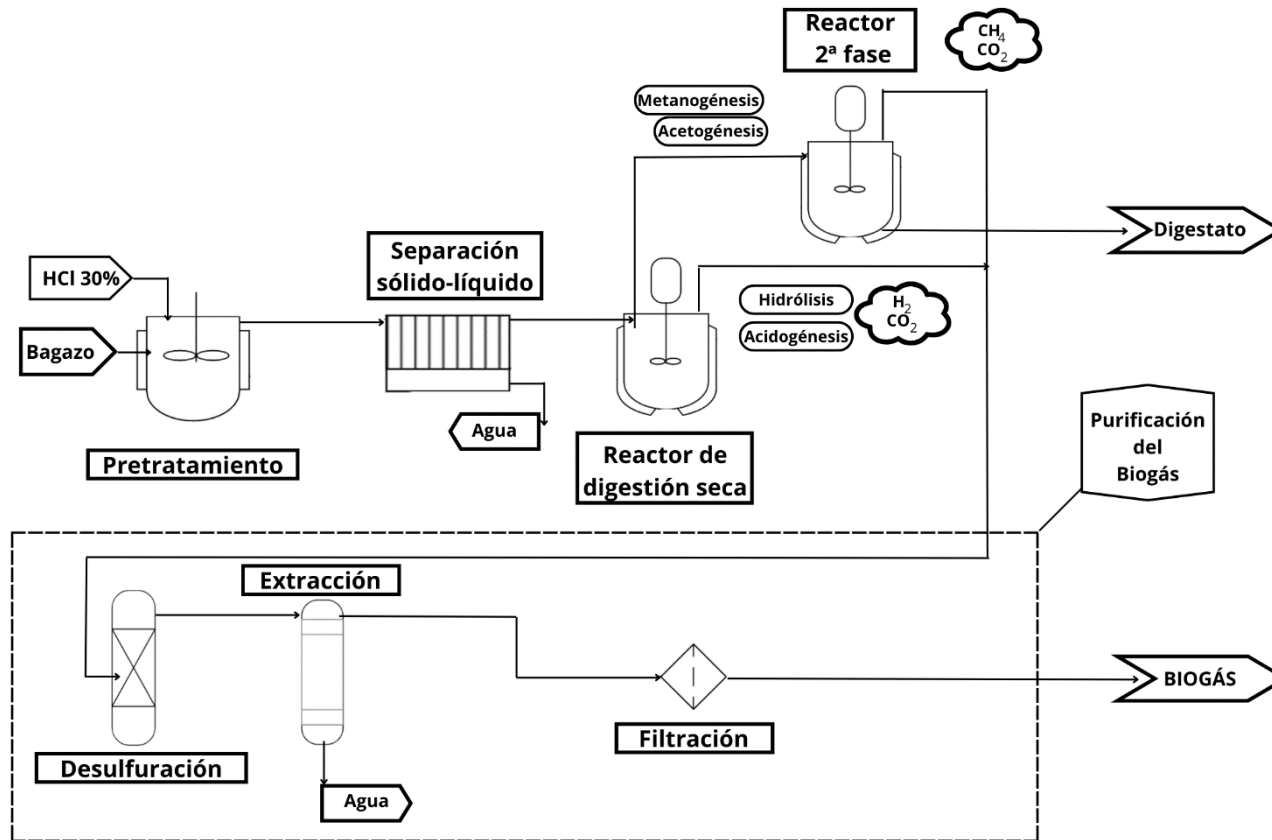


Figura 4.13. Digestión anaerobia.

A continuación, se detallarán las operaciones unitarias que aparecen en la figura anterior, mencionando la tecnología seleccionada para cada una de las etapas, así como su justificación.

- **Pretratamiento:** como se ha mencionado anteriormente, el bagazo es un material lignocelulósico, en donde la lignina presenta dificultades para su degradación, por lo tanto, se busca evitar este fenómeno haciendo uso de un pretratamiento del producto basado en la combinación de un pretratamiento térmico con uno ácido. Este pretratamiento consiste en agregar ácido clorhídrico (HCl) al 30% aproximadamente y aumentar la temperatura hasta unos 100°C. Toda esta etapa, se produce conjuntamente en una misma cámara, la cual consta de un sistema de mezclado. Este pretratamiento puede aumentar la producción de biogás en un 120% (Hendriks & Zeeman, 2009).
- **Separación sólido-líquido:** el contenido de sólidos totales presente en el bagazo necesario para la digestión anaerobia se estipula entre el 20% y el 40%. Para ello, en esta etapa se hace uso de un tornillo de prensa horizontal, con la finalidad de reducir la humedad existente en el bagazo. Se trata de unas de las tecnologías de separación más económica y robustas, además, presenta gran facilidad de instalación y mantenimiento. Debido a la morfología de dicha tecnología, el bagazo saliente de la separación es descargado directamente sobre la zona de carga del reactor.
- **Reactor de digestión seca (1ª fase):** como ya se ha explicado, se ha elegido realizar la digestión anaerobia en un sistema combinado de dos fases. Para esta primera fase, en donde ocurren las etapas de hidrólisis y acetogénesis, se ha seleccionado operar de forma discontinua, por lo tanto se empleará un reactor tipo Batch, el cual es el tipo más estandarizado para pequeñas producciones de biogás. La mayor ventaja de este sistema combinado es la reducción de tiempos en el proceso, puesto que el paso de la primera a la segunda fase no se realiza con la totalidad del producto de entrada, dejando en cada proceso una pequeña parte de mezcla ya fermentada para acelerar la obtención de biogás en posteriores procesos. Atendiendo a las características de este primer biodigestor, este se puede considerar como un reactor de lecho fluidizado, al disponer de una película totalmente fija en donde la biomasa tiende a lavarse debido a la gran cantidad de

flujo ascendente. Este reactor puede venir con sistema de mezcla integrado, o por lo contrario se puede optar por añadir una ligera inclinación en la carga del sustrato evitando así la acumulación del mismo y favoreciendo a su vez la carga homogénea en el interior del reactor (Espitia & Ruiz, 2022).

- Reactor de 2ª fase: en este reactor ocurrirán las etapas acetogénica y metanogénica del proceso. Para esta fase, se empleará un reactor similar al detallado para la primera fase, variando únicamente las condiciones de optimización a las que se ha de encontrar cada reactor dependiendo de las etapas del proceso que ocurran en su interior tal como ya se ha explicado.

Además, por otro lado, se ha de tener en cuenta, que el biogás producido en el proceso ha de pasar por una purificación previa a su utilización y/o comercialización, debido a que el biogás a la salida de los reactores se encuentra con un alto contenido en vapor de agua y posee una pequeña concentración de diferentes impurezas como puede ser el sulfuro de hidrógeno (H_2S). La combinación de estos dos compuestos mencionados puede dar lugar a la generación de ácido sulfúrico, el cual es altamente corrosivo y perjudicial para el proceso.

Para la purificación del biogás, tal como se muestra en la figura 4.13, se decide contar con una torre de relleno haciendo interaccionar los compuestos derivados del azufre con el medio filtrante (etapa de desulfuración). Este método presenta una gran ventaja frente a sus competidores, ya que el medio filtrante puede renovarse o recuperarse, por lo que la vida útil de la tecnología seleccionada aumenta considerablemente.

Seguidamente, se pasa a una segunda etapa de separación para la extracción de vapor de agua, para finalmente hacer pasar el biogás resultante por un filtro para quitar las impurezas restantes de azufre que no se hayan eliminado durante la desulfuración. Estos procesos dan como resultado un biogás compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono en óptimas condiciones para la generación de electricidad. Por último, como se muestra en la figura 4.13 es necesario la colocación de una antorcha por seguridad en caso de parada o emergencia en la planta. Debido a que, en el caso en donde el uso del biogás no sea posible, por bajada en la necesidad de suministros u otros factores, no se puede liberar el metano directamente a la atmósfera, por lo tanto el biogás se ha de quemar en la cámara de combustión de la antorcha.

Seguidamente, se estudiará la capacidad que se adquiere por parte de la empresa cervecera, para que con la instalación del sistema de digestión anaerobia planteado, pueda nutrir de energía térmica a la instalación industrial. Esto, debido a la facilidad de la implementación de dicha tecnología puesto que la fábrica ya cuenta con sistemas de generación de vapor, que en el caso de la compañía Mahou-SanMiguel se trata de calderas alimentadas a base de gasoil. Para ello, se estudiarán los rendimientos típicos del sistema de generación de biogás planteado, usando como referencia los datos obtenidos en el estudio realizado por Panjicko et al. (2017).

En primer lugar, se ha de tener en cuenta que la producción de biogás que se obtendrá de un residuo determinado depende de su potencial (producción máxima), del tiempo de retención, de la velocidad de carga orgánica, de la temperatura de operación y de la presencia de inhibidores principalmente, como se ha detallado en apartados anteriores. Según el estudio mencionado, y como se ha tratado en el apartado 4.3.3.1., la producción neta de biogás media según el proceso descrito con anterioridad teniendo en cuenta las características ya mencionadas, ronda los 91,9 litros por cada kilogramo de bagazo empleado pesado a la salida del proceso de elaboración de cerveza.

Es por esto, que tal y como se describe en el Anexo I la generación de energía térmica mediante este método puede suponer alrededor del 50% de los requerimientos térmicos anuales por parte de la compañía Mahou-SanMiguel, teniendo en cuenta los rendimientos típicos de la tecnología empleada y de la capacidad del bagazo cervecero para generar biogás recogidos en el estudio de Panjicko et al, (2017). Estos datos se obtienen considerando el tratamiento de la totalidad del bagazo generado por la compañía mediante esta vía de valorización, lo cual requeriría una inversión elevada en el equipo necesario para la digestión anaerobia, puesto que al tratarse de un residuo de gran producción los kilogramos de bagazo que ha de albergar el proceso teniendo en cuenta la duración de cada una de las etapas, es decir, el volumen a tratar de bagazo cervecero en cada ciclo, arrojaría que el dimensionado de los equipos necesarios para abarcar tal cantidad sería ciertamente elevado, por lo que se buscaría un enfoque más óptimo, destinando solo una parte del bagazo generado para hacer posible incluir la instalación de una planta de producción de biogás de un tamaño reducido que aporte beneficio económico a la empresa sin suponer una elevada inversión inicial, ni un

replanteamiento íntegro del funcionamiento y/o distribución de la empresa.

Por otro lado, otra vía de valorización sería la producción de energía eléctrica, la cual supondría una mayor inversión inicial debido a la necesidad de adquisición, además de la tecnología de digestión anaerobia ya nombrada, del equipo necesario para la generación eléctrica (motor de generación, turbinas...), aun así se puede determinar que, a partir de los datos aportados con anterioridad del estudio de Panjicko et al. (2017), el autoabastecimiento energético de las empresa podría llegar a suponer hasta un 60%, por lo tanto, según los datos aportados por la compañía Mahou-SanMiguel su consumo anual es de alrededor de 3 millones de kWh para una producción de 182.000 hectolitros de cerveza, el sistema podría llegar a generar hasta 4,93 MWh diarios. El precio actual del MWh en España ronda los 47,81€/MWh (Omie, 2024), por lo tanto, esto supondría a la empresa un aporte diario de 235,70 €. Nuevamente, estos datos se obtienen considerando un tratamiento total del bagazo generado en la empresa, por lo cual, se insiste que un enfoque más óptimo sería el de solo tratar una parte de dicho subproducto, abaratando la necesidad de inversión así como evitando la necesidad de grandes reestructuraciones en fábrica, lo cual reduciría el beneficio bruto generado, pero haría más factible la implementación de la medida, generando cierto beneficio económico así como beneficio medioambiental al cumplir varios puntos mencionados en los ODS, además de al ser pioneros en este tipo de medidas influiría en la perspectiva social de la empresa aportando diversos beneficios para la compañía.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La producción de cerveza en Canarias es de 1,66 millones de hectolitros al año, generando un total de 33.200 toneladas/año de bagazo.
2. Durante el año 2022 se han recuperado las cifras de producción y consumo anual de cerveza establecidas antes de la pandemia provocada por la Covid-19.
3. La composición del bagazo (15-28% de proteínas y un 70% de fibras) lo convierte en un prometedor recurso para ser valorizado.
4. En la actualidad, en Canarias, el bagazo se destina principalmente a la generación de compost y como parte de la alimentación del ganado de las islas.
5. De todas las alternativas de valorización la producción de biocombustibles y especialmente el biogás se destaca como la más prometedora.
6. Tanto la generación de biopesticidas como de bioadsorbente, a través de este subproducto, aún no se han desarrollado a escala industrial.
7. La alternativa más viable resultó ser la producción de biogás, debido a la facilidad técnica que esta salida presenta, así como la fácil implantación en la industria local de la tecnología necesaria y de las buenas atribuciones económicas y ambientales que esta propuesta desarrolla.
8. El proceso de digestión anaerobia seleccionada consta de un ciclo de dos etapas separando, la hidrólisis de la metanogénesis, debido a las características arrojadas por el bagazo cervecero.
9. A partir de las 3.203 toneladas de bagazo generadas anualmente por la fábrica de la compañía Mahou-SanMiguel emplazada en el polígono Valle de Güímar se puede obtener hasta 294.374 m³ de biogás.

10. El uso de biogás en la compañía como fuente de obtención de energía térmica puede suponer un ahorro del 52,36% de la energía térmica empleada.
11. La producción de energía eléctrica a partir del biogás generado podría llegar a suponer un ahorro de hasta 235,70 € diariamente.

A parte de las conclusiones anteriormente comentadas, se procede a aportar una serie de recomendaciones para continuar la línea de investigación de este proyecto:

- Realizar un estudio de la viabilidad económica tanto de la alternativa seleccionada, como de alguna de las oportunidades de valorización mencionadas en este trabajo.
- Realizar el estudio pertinente para la valorización de los restantes subproductos mencionados, especialmente de las levaduras usadas en la fermentación.
- Realizar un estudio sobre el impacto medioambiental de la implementación de las alternativas estudiadas en el sector cervecero.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

1. Beer production in the Canary Islands is 1.66 million hectoliters per year, generating a total of 33,200 tons/year of bagasse.
2. During 2022, the annual beer production and consumption figures established before the pandemic caused by Covid-19 have been recovered.

3. The composition of bagasse (15-28% proteins and 70% fibers) makes it a promising resource to be valorized.
4. Currently, in the Canary Islands, bagasse is mainly used for the generation of compost and as part of the feeding of the islands' livestock.
5. Of all the recovery alternatives, the production of biofuels and especially biogas stands out as the most promising.
6. Both the generation of biopesticides and bioadsorbent, through this byproduct, have not yet been developed on an industrial scale.
7. The most viable alternative turned out to be the production of biogas, due to the technical ease that this solution presents, as well as the easy implementation in the local industry of the necessary technology and the good economic and environmental attributes that this proposal develops.
8. The selected anaerobic digestion process consists of a two-stage cycle separating hydrolysis from methanogenesis, due to the characteristics produced by the brewing bagasse.
9. From the 3,203 tons of bagasse generated annually by the Mahou-SanMiguel company factory located in the Valle de Güímar industrial estate, up to 294,374 m³ of biogas can be obtained.
10. The use of biogas in the company as a source of thermal energy can lead to savings of 52.36% of the thermal energy used.

11. The production of electrical energy from the biogas generated could lead to savings of up to €235.70 daily.

Apart from the previously mentioned conclusions, a series of recommendations are provided to continue the line of research of this project:

- Carry out a study of the economic viability of both the selected alternative and some of the valuation opportunities mentioned in this work.
- Carry out the pertinent study for the valorization of the remaining by-products mentioned, especially the yeasts used in fermentation.
- Carry out a study on the environmental impact of the implementation of the alternatives studied in the brewing sector.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, S., Méndez, P., & Fresno, M. (2013). *Ensilado de subproductos de la industria cervecera y harinera para alimentación animal*. Obtenido de Gobierno de Canarias. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias:
https://www.icia.es/icia/GanAfrica/Ensilado_Cerveza.pdf
- Aqualimpia Engineering e.K. (8 de Agosto de 2017). *Fases de la digestión anaerobia*. Obtenido de <https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/>
- Aroh, K. (Septiembre de 2018). *Review: Beer Production*. Obtenido de Social Science Research Network : <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3458983>
- Astarte. (s.f.). *Tipos de Cerveza*. Obtenido de Astarteinformatica:
<https://astarteinformatica.com/blog/tipos-de-cerveza-que-todo-restaurante-debe-conocer/>
- BBVA. (21 de Noviembre de 2023). *¿Qué es el compost y cuáles son sus fases? El poder del suelo vivo*. Obtenido de BBVA: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-compost-y-cuales-son-sus-fases-el-poder-del-suelo-vivo/>
- Beer Sapiens. (30 de Septiembre de 2022). *Tipos de malta cervecera*. Obtenido de Beer Sapiens: <https://beersapiens.com/blogs/blog-cervecero-beer-sapiens/tipos-de-malta-cervecera>
- Bellido, C., Pinto, M. L., Coca, M., González-Banito, G., & García-Cubero, M. T. (20 de Junio de 2014). *Acetone-butanol-ethanol (ABE) production by Clostridium beijerinckii from wheat straw hydrolysates: efficient use of penta and hexa carbohydrates*. Obtenido de National Library of Medicine (PubMed): <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24983690/>
- Boletín oficial del Estado. (16 de Diciembre de 2016). *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*. Obtenido de BOE núm. 304: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2016/12/16/678>
- Cerisuelo, A., & Bacha, F. (Junio de 2021). *Materias primas: Bagazo de cerveza*. Obtenido de ReDivia:
https://redivia.gva.es/bitstream/handle/20.500.11939/8240/2021_Cerisuelo%20_Bagazo.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Cervecera de Canarias. (4 de Junio de 2018). *La búsqueda de nuevos usos del bagazo cervecero*. Obtenido de <https://ccc.es/la-busqueda-de-nuevos-usos-del-bagazo-cervecero/>
- Cervecera de Canarias. (s.f.). *Fabricación: Cervecera de Canarias*. Obtenido de ccc.es:
<https://ccc.es/empresa/#fabricacion>
- Cerveceros de España. (2018). *Informe socioeconómico del sector de la cerveza en España*. Madrid.
- Cerveceros de España. (2022). *Informe socioeconómico del sector de la cerveza en España*. Madrid.

- Chang, V. S., & Holtzapfle, M. T. (2000). Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity. *Biochemistry and Biotechnology*, 5-37.
- Cocinista. (s.f.). *Whirlpool*. Obtenido de Cocinistas.es:
<https://www.cocinista.es/web/es/recetas/hacer-cerveza/trucos-y-consejos/whirlpool.html>
- Condorchem Enviro Solutions. (2022). *Valorización de aguas residuales y recuperación de recursos*. Obtenido de <https://condorchem.com/es/valorizacion-residuos>
- Correa, D. F., Beyer, H. L., Possingham, H. P., Thomas-Hall, S. R., & Schenk, P. M. (Julio de 2017). *Biodiversity impacts of bioenergy production: Microalgae vs. first generation biofuels*. Obtenido de Sciencedirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117302691#:~:text=We%20conclude%20that%20microalgal%20systems,and%20no%20application%20of%20pesticides.>
- Dahnum, D., Tasum, S. O., Triwahyuni, E., Nurdin, M., & Abimanyu, H. (2015). Comparison of SHF and SSF processes using enzyme and dry yeast. *Energy Procedia*, 107-116.
- FEDNA. (s.f.). *Raicillas de malta (19% PB)*. Obtenido de Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición animal:
https://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/raicillas-de-malta-19-pb
- Fernández, M., Rodríguez, J. F., & García, M. T. (Enero de 2008). *Application of Supercritical Fluid Extraction to Brewer's Spent Grain Management*. Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/231375170_Application_of_Supercritical_Fluid_Extraction_to_Brewer's_Spent_Grain_Management
- Gandariasbeitia, M., López-Pérez, J. A., Juaristi, B., Abaunza, L., & Larregla, S. (31 de Mayo de 2021). *Biodisinfestation With Agricultural By-Products Developed Long-Term Suppressive Soils Against Meloidogyne incognita in Lettuce Crop*. Obtenido de frontiers: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2021.663248/full>
- Hendriks, A., & Zeeman, G. (11 de Julio de 2009). *Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass*. Obtenido de ScienceDirect:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852408004574?via%3Dihub>
- hosteleríaUNO. (s.f.). *Tipos de Cerveza según su Elaboración y Fermentación*. Obtenido de hosteleríaUNO: <https://hosteleriauno.es/blog/tipos-de-cervezas/>
- Instituto Nacional de Estadística. (2020). *Aportación de la cerveza a la economía Nacional*. Madrid.
- Kunze, W. (2000 (Primera edición en español 2006)). *Tecnología para cerveceros y malteros*. Berlin.

- Mahou-San Miguel. (s.f.). *Cultura cervecera: Mahou-San Miguel*. Obtenido de mahou-sanmiguel.es: <https://www.mahou-sanmiguel.com/es-es/cultura-cervecera>
- Meneses, N. G., Martins, S., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (19 de Abril de 2013). *Influence of extraction solvents on the recovery of antioxidant phenolic compounds from brewer's spent grains*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586613001020>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2023). *Informe del consumo de alimentación en España 2022*. Madrid.
- Nimo, M., & Morón, P. (Octubre de 2019). *Alimentos y bebidas: una llave maestra*. Obtenido de Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca: https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/HomeAlimentos/Publicaciones/Revista/AA_76.pdf
- Omie. (6 de Mayo de 2024). *Mercado diario*. Obtenido de <https://www.omie.es/>
- Otero, M. A., Gerrero, I., Wagner, J. R., Cabello, A. J., Sceni, P., García, R., . . . Almazán, O. (12 de Febrero de 2019). *Yeast and its derivatives as ingredients in the food industry*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/262757545_Las_levaduras_y_sus_derivados_como_ingredientes_en_la_industria_de_alimentos
- Panjicko, M., Zupancic, G. D., Fanel, L., Logar, R., Tisma, M., & Zelic, B. (17 de Agosto de 2017). *Biogas production from brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617316529>
- Pérez-Larrán, P., Díaz-Reinoso, B., Moure, A., Alonso, J. L., & Domínguez, H. (Octubre de 2018). *Adsorption technologies to recover and concentrate food polyphenols*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214799316301321>
- PRIMAGAS. (s.f.). *Biocombustibles: qué son, tipos, ventajas y desventajas*. Obtenido de primagas.es: <https://www.primagas.es/blog/biocombustibles>
- Rachwal, K. (14 de Julio de 2020). *Aprovechamiento de residuos cerveceros en la industria*. Obtenido de PeerJ: <https://peerj.com/articles/9427/>
- Ravanal, M. C. (2023). Bagazo producido en la industria cervecera: Alternativas de valorización y reutilización. *AgroSur*, 1-9.
- Sala, A., Sánchez, A., Barrena, R., & Artola, A. (8 de Julio de 2021). *Producción de biopesticidas fúngicos: una alternativa para la valorización de residuos agroindustriales*. Obtenido de IndustriAmbiente: <https://www.industriambiente.com/articulos/20210708/produccion-biopesticidas-fungicos-alternativa-valorizacion-residuos-agroindustriales>

- Saladini, F., Patrizi, N., Pulselli, F. M., Marchettini, N., & Bastianoni, S. (29 de Febrero de 2016). *Guidelines for emergy evaluation of first, second and third generation biofuels*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304142>
- Sánchez, J. (8 de Febrero de 2023). *Tierra de diatomeas: qué es y para qué sirve*. Obtenido de Ecología verde: <https://www.ecologiaverde.com/tierra-de-diatomeas-que-es-y-para-que-sirve-1687.html>
- SdC. (2021). *Historia de la cerveza*. Obtenido de El Santuario de la Cerveza: <https://elsantuariodelacerveza.com/historia-de-la-cerveza/>
- Secretaría de Cultura de la Nación . (22 de Julio de 2019). *Historia de la cerveza*. Obtenido de Cultura gobierno Argentina: https://www.cultura.gob.ar/cronologia-de-la-cerveza_7973/
- United Nations Global Compact. (2015). *Matriz industrial de los ODS en el sector de la alimentación, bebidas y bienes de consumo*. Obtenido de Pacto Mundial Red Española: https://www.pactomundial.org/wp-content/uploads/2018/07/Matriz-Industrial-de-los-ODS_Alimentaci%C3%B3n-bebidas-y-bienes-de-consumo-.pdf
- Tesis Doctoral: Duque Aldana, C.E. (2018). *Valorización de los residuos de la industria cervecera para utilización como biosorbente*.
- Trabajo Fin de Grado: Nieto Sanz, L. (2019). *Obtención de compuestos antioxidantes a partir de bagazo de cerveza*.
- Trabajo Fin de Grado: Niklitschek Contente, T.A. (2010). *Selección de condiciones de fermentación de residuos de lenga para la producción de bioetanol*
- Trabajo Fin de Grado: Pacheco Espejo, M. (2023). *Estudio de alternativas de reutilización del bagazo producido en la industria cervecera*.
- Trabajo Fin de Grado: Suárez Torres, R.S. (2022). *Valorización del Bagazo Generado en la Producción de la Cerveza para Aplicaciones Medioambientales*.
- Trabajo Integral de Grado: Espitia Rincón, G., Ruiz Padilla, N. (2022). *Desarrollo de una propuesta de digestión anaerobia en dos fases para la obtención de biogás mediante residuos cítricos*.

ANEXO I

- La compañía Mahou-SanMiguel en su fábrica emplazada en la provincia de Santa Cruz de Tenerife, consume anualmente un total de 560.000 litros de gasoil para la generación de vapor.
- El poder calorífico del gasoil ronda los 10 kWh/L
- Aporte energético por parte del gasoil en la planta al año: $560.000 \cdot 10 = 5.600.000$ kWh
- Producción de bagazo durante el año 2023: 3.203,2 toneladas
- Producción de biogás media por kilogramo de bagazo: 91,9 litros
- Producción de biogás: $91,9 \cdot 3.203,2 = 294.374,08$ m³
- Poder calorífico del biogás: 9,96 kWh / m³
- Aporte energético suministrado por el biogás: $9,96 \cdot 294.374,08 = 2.931.965,84$ kWh
- Sustitución por empleo del biogás: $2.931.965,84 / 5.600.000 = 0,5236 \approx 52,36\%$