



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MASTER EN INGENIERIA AMBIENTAL

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Estudio de la factibilidad económica de la producción
fermentativa de biohidrógeno utilizando bagazo de cerveza como sustrato**

Autor: Victor Hugo Lozano Teyer
Tutores: Octavio Garcia Depraect, María Molinos Senante

Valladolid, Septiembre, 2024



Abstract

Global energy demand is continually increasing, posing significant challenges as the majority of energy production relies on non-renewable fossil fuels. In this context, hydrogen emerges as a promising energy vector due to its high energy content and minimal environmental impact, producing only water vapor upon combustion. This study investigates the economic feasibility of producing biohydrogen through dark fermentation using brewery spent grain (BSG) as a substrate. Biohydrogen production from BSG not only provides a sustainable energy source but also contributes to circular economy principles by valorizing industrial waste.

Experimental data were obtained from studies involving pretreated BSG and a mesophilic inoculum subjected to thermal shock to inhibit methanogenic activity. The analysis considered various production scales, from pilot to industrial levels, and evaluated the economic viability in terms of production costs, investment, and potential profits. The results indicate that the use of BSG for biohydrogen production is promising. However, technical challenges remain, particularly in optimizing yield and reducing costs. Future research should focus on improving process efficiency and scaling up production to meet commercial viability requirements.

Keywords: biohydrogen, brewery spent grain, dark fermentation, economic feasibility, renewable energy, circular economy.



Resumen

La demanda mundial de energía está aumentando continuamente, lo que plantea desafíos significativos ya que la mayoría de la producción de energía depende de combustibles fósiles no renovables. En este contexto, el hidrógeno surge como un vector energético prometedor debido a su alto contenido energético y su mínimo impacto ambiental, produciendo solo vapor de agua al quemarse. Este estudio investiga la viabilidad económica de producir biohidrógeno mediante fermentación oscura utilizando bagazo de cerveza (BSG) como sustrato. La producción de biohidrógeno a partir de BSG no solo proporciona una fuente de energía sostenible, sino que también contribuye a los principios de la economía circular al valorizar los residuos industriales.

Los datos experimentales se obtuvieron de estudios que involucraron BSG pretratado y un inóculo mesófilo sometido a choque térmico para inhibir la actividad metanogénica. El análisis consideró diversas escalas de producción, desde nivel piloto hasta industrial, evaluando la viabilidad económica en términos de costos de producción, inversión y posibles beneficios. Los resultados indican que, aunque persisten desafíos técnicos, especialmente en la optimización del rendimiento y la reducción de costos, el uso de BSG para la producción de biohidrógeno tiene un gran potencial. La investigación futura debería centrarse en mejorar la eficiencia del proceso y en escalar la producción para cumplir con los requisitos de viabilidad comercial.

Palabras clave: Biohidrógeno, Bagazo de cerveza, Fermentación oscura, Viabilidad económica, Energía renovable, Economía circular



Índice

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción | 5 |
| 1.1. | Panorama del biohidrógeno..... | 6 |
| 1.1.1. | Biofotólisis | 8 |
| 1.1.2. | Fotofermentación | 8 |
| 1.1.3. | Fermentación oscura | 8 |
| 1.2. | Panorama económico de producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura | 10 |
| 1.3. | Bagazo de cerveza como sustrato para la producción de biohidrógeno..... | 12 |
| 2. | Objetivos | 16 |
| 3. | Metodología | 16 |
| 3.1. | Descripción del análisis experimental..... | 16 |
| 3.2. | Viabilidad económica..... | 19 |
| 3.3. | Escenarios analizados..... | 22 |
| 4. | Resultados | 23 |
| 5. | Conclusiones | 32 |
| | Bibliografía..... | 34 |

1. Introducción

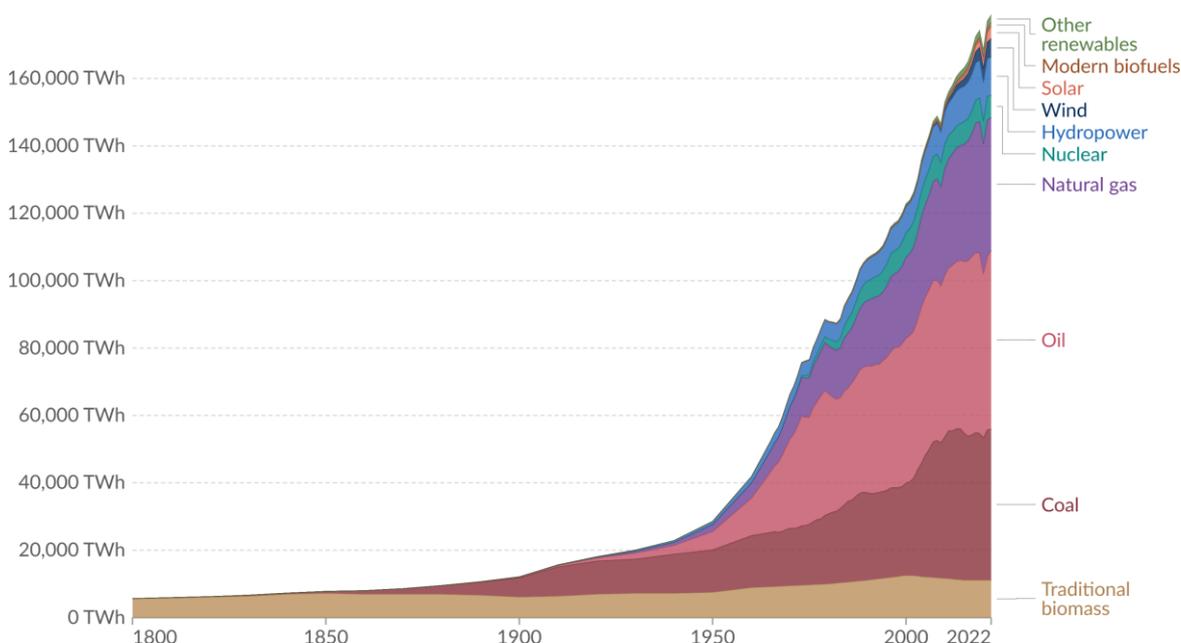
En la actualidad, a nivel mundial la demanda de fuentes de energía se está viendo al alza de forma creciente, lo cual representa una problemática que afecta a todos de manera cotidiana [1]. Actualmente, el 80% de la producción de energía se realiza con combustibles fósiles no renovables como carbón, petróleo y gas natural [2], como se muestra en la Figura 1. De acuerdo con la naturaleza no renovable de estos combustibles, éstos se acabarán en un futuro cercano.

De igual manera, los combustibles fósiles generan gases de efecto invernadero (GEI) que contribuyen al cambio climático y calentamiento global y, por lo tanto, en la actualidad se está promoviendo su reducción de manera que las industrias tengan emisiones de carbono neutras. En este contexto, se busca la implementación de prácticas y tecnologías en la industria que resulten en cero emisiones netas de dióxido de carbono (CO₂) y otros GEI. Este enfoque es fundamental para combatir el cambio climático y se basa en la reducción, eliminación y compensación de emisiones.

Global primary energy consumption by source

Primary energy¹ is based on the substitution method² and measured in terawatt-hours³.

Our World in Data



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023); Smil (2017)

OurWorldInData.org/energy | CC BY

Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

Figura 1. Consumo de energía global por fuente de energía [2].



En este contexto energético, se tiene que considerar el desarrollo de fuentes de energía alternativas como el hidrógeno el cual es un vector de energía con un gran potencial para contribuir a una economía más sostenible y reducir las emisiones de GEI ya que solo genera vapor de agua como producto de su combustión.

De igual manera, están en consideración los biocombustibles como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles ya que estos generan menos gases contaminantes como producto en su combustión. Entre los biocombustibles destacan los de primera generación, tales como:

- Bioetanol: Producido a partir de la fermentación de azúcares presentes en cultivos como el maíz, la caña de azúcar, el trigo y otros cereales.
- Biodiésel: Producido a partir de aceites vegetales como el aceite de soja, colza o palma, y grasas animales.
- Biogás: Generado a partir de la descomposición anaerobia de materia orgánica, incluyendo residuos agrícolas, estiércol, residuos sólidos urbanos, entre otros.
- Bioalcoholes: Además del etanol, se pueden producir otros alcoholes como el metanol y el butanol a partir de biomasa vegetal.

En la actualidad, estos biocombustibles de primera generación en algunos casos producen más GEI que los generados en la extracción y refinamiento de petróleo. Esto es debido al transporte de materias vegetales utilizadas, el uso de tierra, la contaminación asociada con el uso de fertilizantes nitrogenados y al refinamiento de estas [3]. Sin embargo, se considera relevante su producción debido a que se pueden producir utilizando residuos de materia orgánica tales como residuos de comida [4], o residuos orgánicos de procesos industriales, valorizando así estos residuos al convertirlos en una fuente de energía y, por lo tanto, contribuyendo a la economía circular.

1.1. Panorama del biohidrógeno

El biohidrógeno es un tipo de hidrógeno verde y un biocombustible que puede ser producido utilizando biomasa como residuos de la industria agrícola o alimentaria, entre otros residuos orgánicos. El biohidrógeno cuenta con un contenido energético de 142 kJ/g y representa una



alternativa limpia a los combustibles fósiles debido a que este sólo genera vapor de agua como producto de su combustión.

A pesar de que la producción de biohidrógeno presenta serios retos asociados a los altos costes de producción, así como a dificultades técnicas presentes durante su almacenamiento y producción, etc. (Tabla 1), éste es un biocombustible prometedor debido a su bajo impacto ambiental asociado, su buen contenido energético, la variabilidad de materias primas que se pueden utilizar para su producción y que la mayoría de estas materias primas incentivaban el desarrollo de la economía circular al valorizar residuos industriales y residuos de agricultura.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del biohidrógeno [Elaboración propia, 2024].

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| No produce gases de efecto invernadero | Altos costes de producción |
| Alto contenido energético | Difícil detectar fugas en su almacenamiento |
| Fomenta una economía circular | Dificultad para su almacenamiento |
| No genera residuos tóxicos para el ser humano o medioambiente | Rendimiento variable según la materia prima |
| Múltiples vías para su obtención | Requiere que los equipos para transformar a energía estén diseñados para este combustible |
| Investigaciones y desarrollos tecnológicos | Poca madurez en las tecnologías de producción |

España está invirtiendo fuertemente en proyectos de hidrógeno verde, con el objetivo de convertirse en líder en el mercado europeo de hidrógeno. El país planea instalar más de 2 GW de capacidad de electrolizadores para 2024, con la meta de aumentar esta capacidad a aproximadamente 4 GW para 2030. Estos esfuerzos forman parte de una iniciativa europea más amplia para impulsar la producción y utilización del hidrógeno, con un apoyo significativo en financiación y políticas por parte de la Unión Europea [5].

A continuación, se presentarán las alternativas de producción de biohidrógeno utilizando sustratos biológicos. Las alternativas son: biofotólisis, fotofermentación y fermentación oscura.



1.1.1. Biofotólisis

Es un proceso en el cual se utiliza el efecto que tiene la luz en sistemas biológicos para dividir las moléculas de agua y de esta manera generar hidrógeno elemental. Se puede realizar utilizando algas, cianobacterias, al igual que otros organismos fotosintéticos [6]. Este proceso se puede dar de manera directa o indirecta. De manera directa el proceso es simple y conlleva la siguiente reacción:

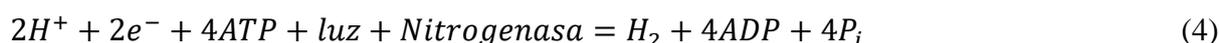


La biofotólisis indirecta conlleva un proceso de fotosíntesis y almacenamiento de carbohidratos. Se da en 2 fases y se representa con las siguientes reacciones:



1.1.2. Fotofermentación

En este proceso se generan reacciones bioquímicas en las que los sustratos orgánicos se fermentan utilizando una serie de bacterias fotosintéticas en un medio anaerobio [7]. Esto se puede representar utilizando la siguiente ecuación:



En este proceso se pueden generar ácidos grasos volátiles (AGV) los cuales también pueden ser utilizados como sustrato en la producción de H_2 :



1.1.3. Fermentación oscura

La fermentación oscura es un proceso complejo en donde la materia orgánica, principalmente carbohidratos se fermentan en condiciones anaerobias y sin energía lumínica, produciendo hidrógeno y otros subproductos como ácidos orgánicos y alcoholes. La fermentación oscura se destaca gracias a versatilidad para utilizar varios sustratos (e.g., aguas residuales agroindustriales, residuos orgánicos, etc.), así como por su elevada tasa de producción de entre 0.5 a 30 L H_2 /L/d, dependiendo de las condiciones de proceso, ambientales y microbiología [7,

8] sobre los demás procesos biológicos. El proceso de fermentación oscura esta mediado por bacterias especializadas hidrolíticas-acidogénicas, incluyendo bacterias productoras de hidrógeno, que pueden operar en condiciones mesofílicas y termofílicas [9]. En este proceso se puede utilizar biomasa de bajo coste como sustrato [10] tales como residuos orgánicos. En la Figura 2, se muestra un diagrama del proceso de producción de biohidrógeno usando fermentación oscura.

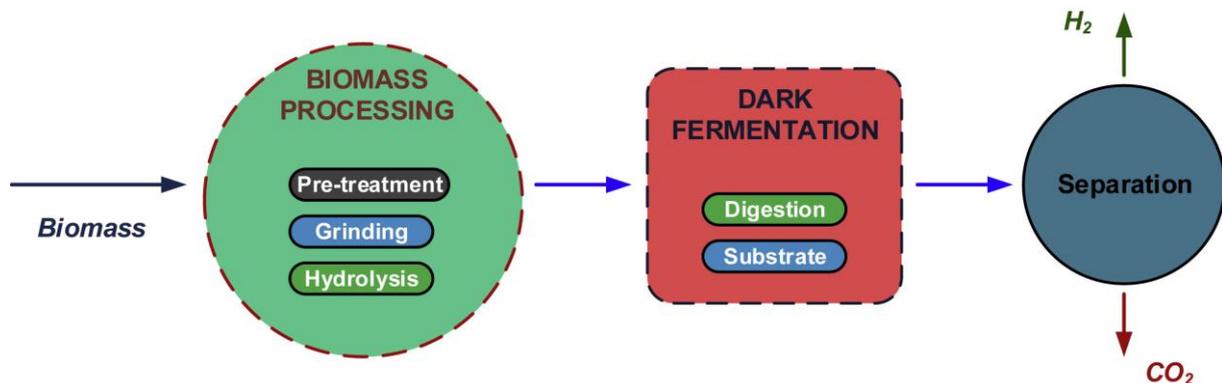


Figura 2. Diagrama de proceso simplificado de fermentación oscura [10].

En la producción de biohidrógeno a través de fermentación oscura hay tres parámetros de operación muy relevantes: el tiempo de retención hidráulico (HRT), el pH y la presión parcial del gas en cuestión. El pH standard en este caso es entre 5.5 y 6.5 [9]. Recientemente, se han realizado estudios en plantas piloto de 380 a 3000 L [11, 12, 13] cuyos resultados demuestran que se pueden esperar rendimientos similares a los obtenidos a escala laboratorio. De igual manera, se han realizado múltiples investigaciones para el desarrollo de esta tecnología utilizando diferentes sustratos como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Producción de hidrogeno en fermentación oscura [Elaboración propia, 2024].

| SUSTRATO | CONDICIONES | PRODUCCIÓN | REFERENCIA |
|----------------|--------------------------|---|------------|
| Restos de tofu | HRT 4, pH 5.5 110 °C | 12.01 H ₂ /Dia | [14] |
| Sorgo | HRT 12, pH 4.7, 35 °C | 0.93mol H ₂ /mol Glucosa | [15] |
| Ensilaje | pH 7, 35 °C | 37.8 ml H ₂ /g ensilaje | [16] |
| Trigo | HRT 17, pH 6,3, 37 °C | 4.55 mol H ₂ /mol glucosa | [17] |
| Pasto seco | pH7, 37 °C | 72.21 mL/g pasto seco | [18] |
| Sacarosa | pH 5.5, 35 °C | 120 mol/m ³ -d | [19] |

1.2. Panorama económico de producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura

Junto con la viabilidad técnica de producir biohidrógeno utilizando distintas materias primas o residuos es esencial evaluar su viabilidad económica para analizar su posible fabricación a nivel comercial. Entre los estudios realizados enfocados en el análisis económico de la producción continua de biohidrógeno utilizando fermentación oscura se destacan aquellos que producen biohidrógeno utilizando como sustrato restos de pan [20], restos de comida [4] y sustratos de bajo costo tales como residuos orgánicos municipales [21]. En lo general, estos estudios se enfocan en la productividad del proceso y en los costos asociados con la producción sin considerar los costos de inversión requeridos para la construcción y puesta en marcha de una planta de procesamiento de este tipo.

En relación a la producción de biohidrógeno a partir de restos de pan [20], se determinó que el costo de inversión de una planta considerando un volumen de reactor de 29.4 metros cúbicos sería de US\$931,020 (Figura 3). A su vez, se estimaron unos costos de operación de US\$299,746 (Figura 4). Considerando un coste de venta de 6.3 US\$/kg de hidrógeno, se estimó

una ganancia anual de US\$244,186 (Figura 5), por lo que, se consideró un resultado positivo y que este proceso es económicamente factible.

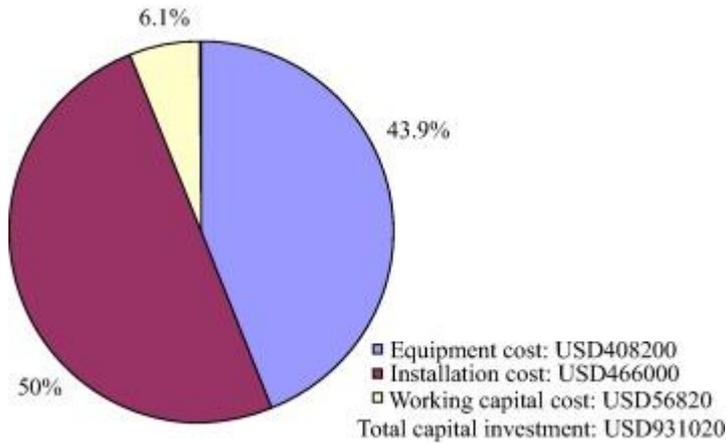


Figura 3. Costos de inversión para la producción de biohidrógeno usando pan como sustrato [20]

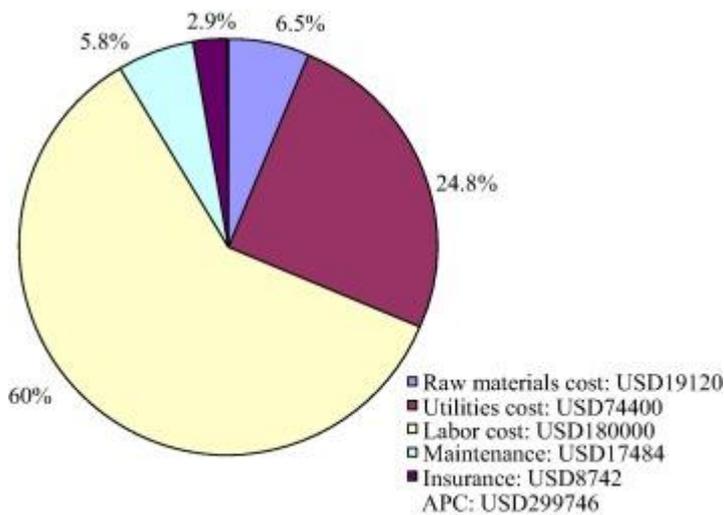


Figura 4. Costos de operación anuales para la producción de biohidrógeno usando pan como sustrato [20]

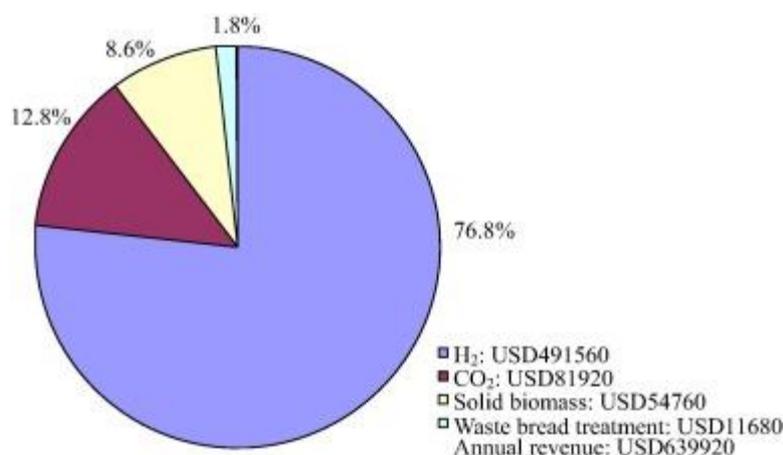


Figura 5. Porcentajes de ganancias anuales asociadas a la producción de biohidrógeno usando pan como sustrato [20]

Tras realizar un análisis de la bibliografía existente se encuentra poca o nula investigación relacionada a los procesos de producción continua de biohidrógeno utilizando bagazo de cerveza como sustrato. De igual manera las investigaciones encontradas [14-21] no abordan a profundidad los temas relacionados a los aspectos económicos relacionados a estos procesos.

1.3. Bagazo de cerveza como sustrato para la producción de biohidrógeno

La industria cervecera tuvo una producción mundial de 1.900 millones de hectolitros en el 2022 [23]. El proceso de producción de cerveza, como se muestra en la Figura 6, inicia con la molienda de granos de malta, los cuales generalmente son granos de cebada, para extraer el almidón. A continuación, se inicia el proceso de maceración, en el cual se mezclan los granos con agua caliente para iniciar el proceso de fermentación del almidón. El líquido resultante se denomina mosto y se separa de los granos. Seguido de esto, se lava el grano con más agua caliente, la cual se mezcla con el mosto y con lúpulo para el proceso de ebullición. Luego de la ebullición, el mosto se enfría rápidamente y se le agrega levadura para iniciar el proceso de fermentación en el cual se produce la cerveza. Es en este punto, es cuando se separa el mosto y el grano, el cual se denomina bagazo [6].



Figura 6. Diagrama general de proceso de producción de cerveza [24]

Se estima que se genera en promedio 20 kg de bagazo por cada hectolitro de cerveza producida [24]. Esto se puede observar en la Figura 7 en la cual se muestra las entradas y salidas del proceso de producción de cerveza. El bagazo de cerveza es una materia prima de bajo costo al ser un subproducto de la producción de cerveza y es rico en lignina, celulosa y hemicelulosa, siendo la celulosa y la hemicelulosa componentes importantes para la producción de biohidrógeno.

Considerando los datos de producción de cerveza en 2022 [23], se puede estimar que anualmente se produjeron unas 38.000.000 de toneladas de bagazo a nivel mundial. Por lo tanto,

es importante considerar posibles vías para la valorización del bagazo, en este caso enfocándonos en la valorización energética mediante la producción de biohidrógeno de manera continua utilizando fermentación oscura.

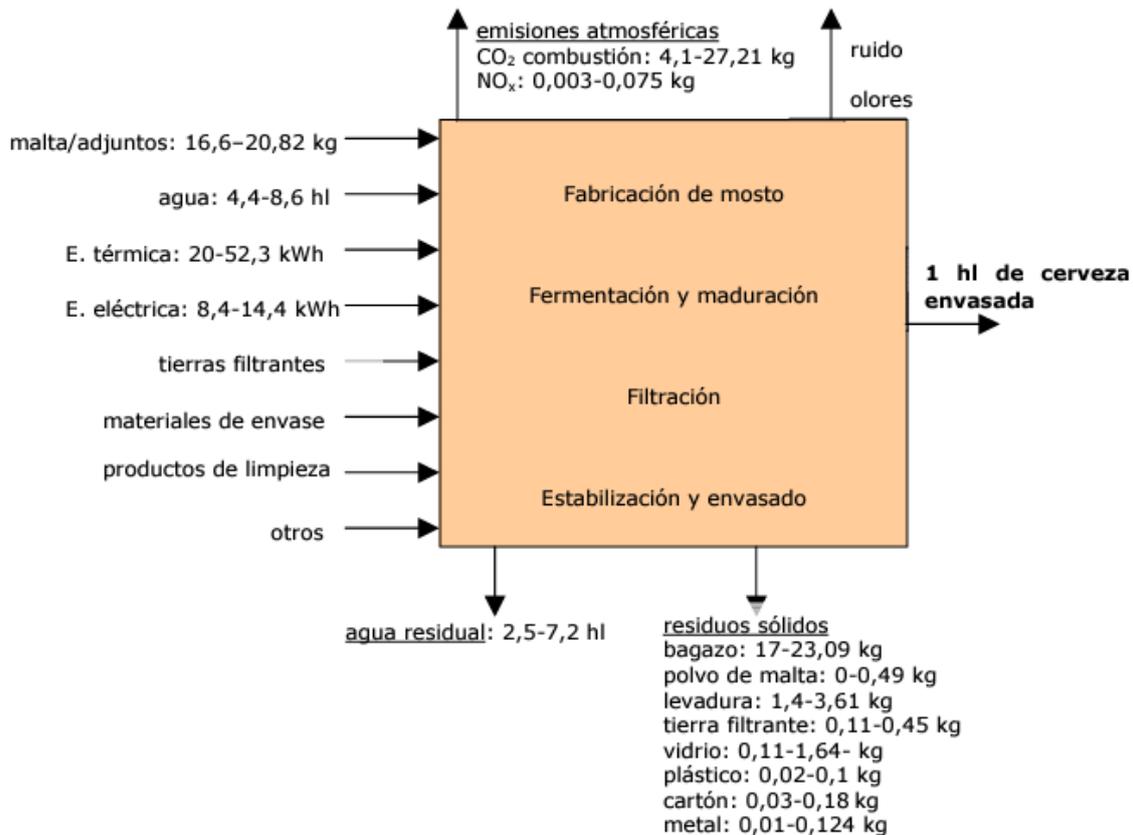


Figura 7. Balance general de producción de cerveza [5]

La composición estructural del bagazo de cerveza puede variar mucho según la calidad de la cebada utilizada previamente y también según los procesos utilizados en la producción de la cerveza y las condiciones de operación de estos. Sin embargo, se estima que éste cuenta con aproximadamente 5% de lignina [25] (Tabla 3).



Tabla 3. Composición del bagazo húmedo de cerveza [25]

| Componente | Composición (%) |
|-----------------|-----------------|
| Humedad | 74,2 |
| Cenizas | 3,9 |
| Proteína Bruta | 26,3 |
| Extracto etéreo | 7,93 |
| Fibra Bruta | 17,8 |
| Fibra Neutro | 53,2 |
| Fibra Acido | 27,0 |
| Almidón | 4,08 |
| Lignina | 5,13 |

La lignina es un compuesto orgánico encontrado en las plantas que en conjunto con la hemicelulosa otorgan rigidez estructural a las mismas y una protección a la celulosa y otros compuestos estructurales, por lo cual su presencia otorga un carácter recalcitrante a la biomasa. En conjunto, estos compuestos lignocelulósicos se pueden utilizar para producir productos químicos especializados y de alto valor. En procesos biológicos destinados, por ejemplo, a la producción de biohidrógeno, ácidos orgánicos o biogás, comúnmente se pretrata el bagazo para facilitar la asimilación de azúcares fermentables mediante la remoción parcial de lignina [26].

De igual manera, debe considerarse que un proceso biológico para la valorización energética del bagazo mediante la producción de biohidrógeno no sería la única alternativa de gestión del bagazo ya que en la actualidad existen diferentes alternativas de gestión que pueden servir para dar un valor agregado a este residuo como alimento ganadero, materia de compostaje o bien en la síntesis de otros bioproductos tales como ácidos orgánicos o biogás. Así, en la actualidad, el bagazo de cerveza es generalmente gestionado para su uso como alimento para ganado o para compostaje [6]. Sin embargo, entre las alternativas se encuentra también su utilización en la producción de biocombustibles como el etanol [27], butanol [28] y metanol [29].



2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es analizar la viabilidad económica del proceso de producción de biohidrógeno usando como materia prima bagazo de cerveza mediante un proceso continuo de fermentación oscura.

Los objetivos específicos son:

- i) Analizar el impacto de la escala en la viabilidad económica de producción de biohidrógeno usando bagazo de cerveza como sustrato. En este caso, se realizó el análisis económico para 4 escalas de producción. Por una parte, se consideraron dos escalas “demo” de 100 y 1,000 litros de volumen del reactor de fermentación y dos a escala industrial una de 100,000 litros de volumen del reactor de fermentación y otra usando datos de producción estándar de la industria con un volumen de 158,500 litros;
- ii) Determinar los rendimientos de producción de biohidrógeno que serían necesarios para que el proceso sea viable económicamente.

3. Metodología

3.1. Descripción del análisis experimental

Para este estudio, se utilizaron los datos experimentales obtenidos por Pérez-Barragán et al. (2024) [30], quienes evaluaron la producción de biohidrógeno, ácidos orgánicos y biogás a partir de bagazo de cerveza pretratado. En el estudio se utilizó un inóculo acidogénico obtenido de un digestor anaerobio que trata restos de comida en condiciones mesófilas. Este inóculo recibió un tratamiento de choque térmico (121 °C, 20 min) para eliminar su actividad metanogénica. El bagazo utilizado en este caso fue obtenido de una cervecería local de Valladolid, no recibió tratamientos previos y fue almacenado a -20°C hasta su uso.

El bagazo utilizado tenía una concentración de sólidos del 7% w/w, y recibió un tratamiento térmico asistido por ácido diluido en el cual se utilizó ácido sulfúrico con una pureza de 96% y 1.84 g/ml de densidad en una botella de 10 litros de borosilicato. La mezcla resultante se llevó a una autoclave a 121°C por 20 minutos. Finalmente, se filtró el hidrolizado usando un filtro metálico con un tamaño de poro de 850 µm para separar la fase líquida para su



posterior uso en el proceso de fermentación. Este hidrolizado tuvo una composición de 22% proteína, 43% celulosa y 35% lignina aproximadamente.

La fermentación se realizó utilizando un reactor de cloruro de polivinilo de 1.2 L con un control de pH para las fases líquida y gas para mantener este en $6 \pm 0,1$ usando NaOH 6M. También se contó con medidores de flujo de gas y fue agitado magnéticamente a 300rpm durante todo el proceso. En la Figura 8, se presenta un diagrama de flujo del proceso de producción de biohidrógeno a partir del bagazo, considerando igualmente el pretratamiento para conseguir el hidrolizado que sirve de materia prima para el proceso en cuestión.

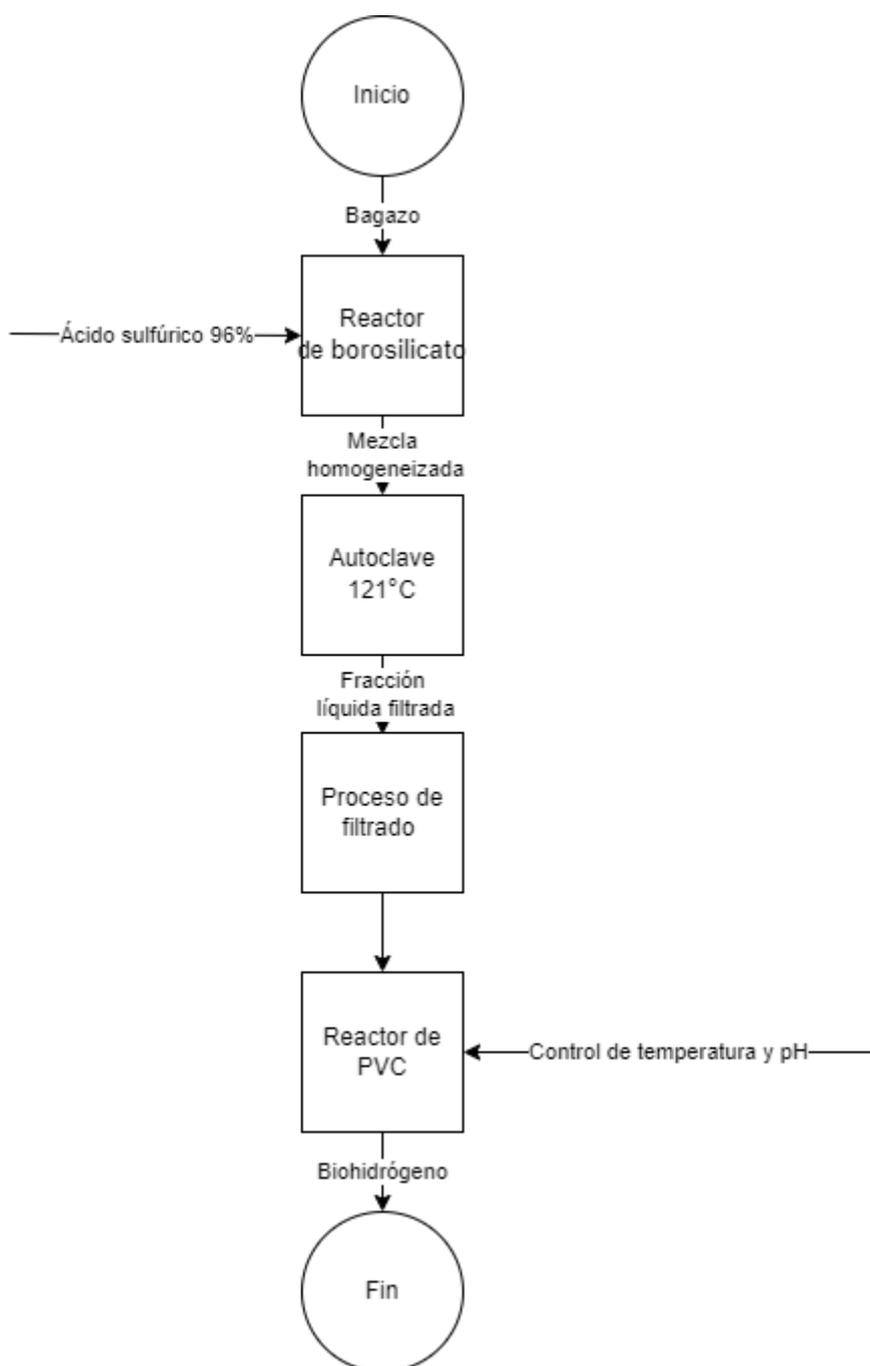


Figura 8. Diagrama de flujo simplificado del proceso [Elaboración propia, 2024].

En el análisis experimental se consideraron 3 diferentes tiempos de retención hidráulico (TRH) de 6, 9 y 12 horas y se llegó a la conclusión de que 6 horas fue el TRH óptimo (máxima velocidad volumétrica de producción de hidrógeno). Considerando esto, se utilizarán los valores de producción obtenidos con ese TRH para los cálculos económicos a realizar. En este caso, se obtuvieron 5.9 L de hidrógeno por cada litro de reactor por día de operación.



3.2. Viabilidad económica

Para poder realizar un análisis de viabilidad económica de esta propuesta de valorización se estimarán los indicadores básicos de valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión inicial. Se uso la tasa de inflación de España en 2023 según el Instituto Nacional de Estadística de 3.4% anual como la tasa de descuento para el cálculo de estos indicadores. Se estima una vida útil de 20 años debido a que se considera que después de ese periodo los equipos utilizados ya están obsoletos y requieren una nueva inversión para su remplazo. De igual manera no se pueden vender los equipos al final del periodo.

El VAN es una herramienta financiera utilizada para evaluar la viabilidad de una inversión o proyecto. Si su valor es positivo se puede considerar que el proyecto es económicamente viable y su fórmula es la siguiente:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad (6)$$

donde I_0 es la inversión inicial, F_t es el flujo de caja del periodo el cual es la diferencia entre los costes e ingresos del periodo, n es la vida útil del proyecto y k es la tasa de descuento o interés.

La TIR representa la tasa de descuento a la cual el VAN de un proyecto se iguala a cero. Por lo tanto, es la tasa de descuento que hace que el costo de la inversión sea exactamente igual a los beneficios futuros generados por ese proyecto. Su fórmula es la siguiente:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (7)$$

De igual manera se entiende el periodo de recuperación de inversión como el número de periodos de tiempo (años) que tienen que pasar para que se recupere la inversión inicial del proyecto. En este caso como se calcula como:

$$PIR = I_0/F_t \quad (8)$$



Debido a la naturaleza de la operación y al hecho de que los costes asociados con la preparación del inóculo para el proceso de producción de biohidrógeno son despreciables al ser muy bajos en comparación con el resto de los valores del CAPEX inicial, estos costes se despreciaron. De igual manera, se despreciaron posibles costes que se puedan generar de la puesta en marcha tras paradas del proceso para mantenimiento ya que estos incluirían el coste de preparación de inóculo nuevamente y no se esperan paradas del proceso como para justificar su inclusión en los costes de operación.

Para el cálculo de coste de inversión (I_0) o CAPEX se realizaron una serie de simulaciones en ASPEN PLUS 14. Estas simulaciones permitieron estimar los costes de los equipos principales utilizados en el proceso iniciando desde la preparación del hidrolizado hasta la producción de biohidrógeno. De esta manera, también se calcularon los costes de los servicios auxiliares de electricidad y el coste de las bombas utilizadas.

En estas simulaciones se consideraron los siguientes equipos: un fermentador de operación continua y un reactor para la producción del líquido hidrolizado igualmente en operación continua para las cuatro escalas analizadas. Se consideraron los servicios auxiliares necesarios para la operación de ambos y los equipos de instrumentación y control requeridos.

Una vez obtenidos los costes de los equipos en la simulación, se procedió a utilizar el método de factores de Miller [31] para la estimación de los costes de instalación de los equipos al igual que los costes de servicios auxiliares asociados con el proceso (ver Tabla 4). En este caso, no se consideraron los costes de fabricación del edificio o de excavación y preparación del sitio de operación al ser estos costes ya considerados al estar una industria cervecera existente.



Tabla 4. Factores de Miller usados [31].

| Partidas | Procesamiento de sólidos y fluidos | Procesamiento de fluidos |
|-----------------------|---|---------------------------------|
| Equipo entregado | 1.00 | 1.00 |
| Instalación | 0.39-.043 | 0.76 |
| Tuberías | 0.30-9.39 | 0.33 |
| Cimientos | - | 0.28 |
| Instalación eléctrica | 0.08 | 0.17 |
| Instrumentos | 0.13 | 0.13 |
| Auxiliares | 0.48-0.55 | - |

En el caso del reactor de preparación del hidrolizado se utilizaron los factores de procesamiento de sólidos y fluidos y en el caso del reactor de fermentación, los factores de procesamiento de fluidos.

Los costos de operación (OPEX) se calcularon utilizando los datos de consumo del proceso al igual que los salarios estándar de los operadores para este tipo de operaciones industriales. De igual manera, se consideraron valores estándar para industrias para calcular los demás valores asociados con la operación de la planta, cuestiones como: seguros, laboratorios externos, prevención de impactos ambientales, prevención de riesgos laborales, mantenimiento, capacitación, servicios de emergencia, material de oficina, servicios técnicos auxiliares externos.

Para el cálculo de ingresos, se considera el precio de venta general de biohidrógeno a 7.5 €/kg. Actualmente el precio de venta del biohidrógeno oscila entre 3-10 €/kg, pero se seleccionó 7.5€/kg como una media optimista considerando la posibilidad de que este valor aumente en el futuro debido al incremento de las demandas energéticas [2, 32]. De igual manera, se consideró que la producción de biohidrógeno mantenga la productividad observada en el análisis experimental y que esta no se altere o modifique al cambiar la escala del proceso.



3.3. Escenarios analizados

Para este estudio de factibilidad económica, es importante situar este estudio en un punto geográfico, en este caso en España. En el año 2022, España produjo 41.1 millones de hectolitros de cerveza [33] lo cual representa 822.000 toneladas de bagazo de cerveza.

La hipótesis de estudio considera que construir y operar las plantas de producción de biohidrógeno en las mismas cerveceras puede mejorar la viabilidad económica de los procesos al disminuir los costes de instalación de los equipos necesarios para el proceso debido a que no se tendría que realizar la excavación del sitio o la construcción del edificio donde se realizara la producción. En esta situación, se despreciarían estos valores en los cálculos realizados usando los factores de Miller.

Para este análisis, se consideraron los escenarios de un reactor de fermentación de diferentes volúmenes. Esto naturalmente afecta los caudales de entrada de bagazo hidrolizado y los caudales de salida de biohidrógeno obtenidos al igual que los tamaños de operación del reactor de pretratamiento.

Para esta parte del estudio se realizarán una serie de supuestos, primero se entiende que este proceso se replicara a una escala demo y a una escala industrial. Por lo tanto, los volúmenes de los equipos tendrán que ser modificados acorde a esto. Se proponen diferentes escenarios para estimar la viabilidad económica determinados por el volumen del reactor para la fermentación: 100 L, 1,000 L, 100,000 L y 158,512 L. Estos escenarios representan 2 escalas semi industriales tipo demo y 2 escenarios industriales. El escenario con un volumen de reactor de fermentación de 158,512 L se consideró según el informe de producción de una empresa cervecera española correspondiente al año 2023. Este último caso representa una versión más realista del proceso ya que se encuentra basado en datos de una cervecera actualmente en operación en España. La Tabla 5 presenta las dimensiones de los diferentes escenarios considerados.

Tabla 5. Volúmenes de los escenarios analizados.

| Volumen reactor pretratamiento (L) | Volumen reactor fermentación (L) | Caudal de entrada (L/h) | Caudal de salida (L/h) |
|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|------------------------|
| 430 | 100 | 16.67 | 24.33 |
| 4,300 | 1,000 | 166.7 | 243.33 |
| 430,000 | 100,000 | 16,666.66 | 24,583.33 |
| 681,604.70 | 158,512 | 113,603.05 | 38,967.71 |

4. Resultados

Una vez realizada la simulación en ASPEN PLUS 14 se obtuvieron los resultados de los costes de los equipos propuestos como se muestra en las Figuras 9, 10-13. Los valores de costes en dichas figuras se encuentran en dólares americanos (USD). Para su valor en euros se utilizó la tasa de conversión de 1 euro a 1.08 USD:

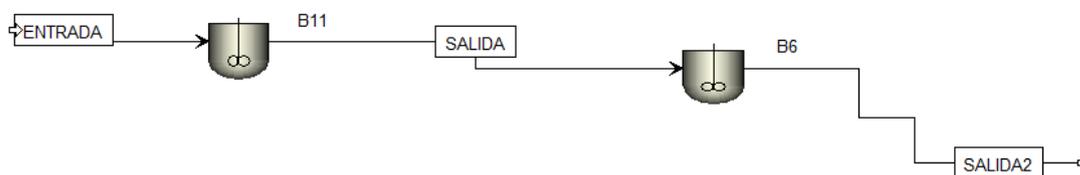


Figura 9. Simulación en ASPEN PLUS 14 del proceso y los equipos.

Enabled by Aspen Process Economic Analyzer (APEA)

Template: <Default> Save Save as new Reset Paste Send to Excel/ASW

Summary Utilities **Unit operation** Equipment Agitated reactor Centrif pump

| Name | Equipment Cost [USD] | Installed Cost [USD] | Equipment Weight [LBS] | Installed Weight [LBS] | Utility Cost [USD/HR] |
|------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| B6 | 66.500 | 236.700 | 3200 | 14092 | 0 |
| B11 | 96.000 | 280.500 | 5500 | 18763 | 0 |

Figura 10. Simulación de costes en ASPEN PLUS 14 para un volumen de reactor de 100 L.

Enabled by Aspen Process Economic Analyzer (APEA)

Template: <Default> Save Save as new Reset Paste Send to Excel/ASW

Summary Utilities **Unit operation** Equipment Agitated reactor Centrif pump

| Name | Equipment Cost [USD] | Installed Cost [USD] | Equipment Weight [LBS] | Installed Weight [LBS] | Utility Cost [USD/HR] |
|------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| B6 | 115.300 | 301.700 | 7400 | 20965 | 0 |
| B11 | 189.000 | 381.300 | 15000 | 29544 | 0 |

Figura 11. Simulación de costes para un reactor de 1000 L.

Enabled by Aspen Process Economic Analyzer (APEA)

Template: <Default> Save Save as new Reset Paste Send to Excel/ASW

Summary Utilities **Unit operation** Equipment Agitated reactor Centrif pump

| Name | Equipment Cost [USD] | Installed Cost [USD] | Equipment Weight [LBS] | Installed Weight [LBS] | Utility Cost [USD/HR] |
|------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| B6 | 748.800 | 1.079.300 | 160700 | 197424 | 0 |
| B11 | 2.110.100 | 2.600.900 | 485500 | 555520 | 0 |

Figura 12. Simulación de costes para un reactor de 100,000 L.

Template: <Default> Save Save as new Reset Paste Send to Excel/ASW

Summary Utilities **Unit operation** Equipment Agitated reactor Centrif pump

| Name | Equipment Cost [USD] | Installed Cost [USD] | Equipment Weight [LBS] | Installed Weight [LBS] | Utility Cost [USD/HR] |
|------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| B6 | 956.900 | 1.319.400 | 226400 | 268144 | 0 |
| B11 | 3.268.900 | 3.818.600 | 739100 | 821282 | 0 |

Figura 13. Simulación de costes para reactor industrial de 158,512 L.

Las Tabla 6-13 muestran los costes de inversión y de operación estimados del proyecto en los diferentes escenarios analizados. Los costes de inversión consideran que el equipo esté instalado, cuente con sistemas de instrumentación necesarios y con sistemas de tuberías y bombeo necesarios para la operación del proceso.

En todos los casos, se estimó un coste anual de mantenimiento asociado al coste total de los equipos [28]. En las escalas demo se consideró un coste de personal igual al salario de una persona calificada para la operación del proceso. De igual manera, se estima un coste asociado con capacitación del personal, servicios de emergencia asociados con el personal y material de oficina requerido para la operación y registro del proceso. En el caso de los



escenarios de 100 L y 1,000 L no se consideraron necesarios los puestos de supervisor o jefe de planta ya que se estima que 1 operador pueda tener el control del proceso.

En las escalas industrial, se considera que, debido a la naturaleza y tamaño de los equipos, no es necesario el uso de un autoclave para el proceso. Por el contrario, en las escalas demo (100 L y 1000 L) se considera el uso de un autoclave industrial para incluir en el proceso entre el tratamiento al bagazo y la fermentación.

Finalmente se estimaron costes asociados a los seguros y servicios externos requeridos por el proceso tales como laboratorios, prevención de riesgos y servicios técnicos. Para los costes variables se utilizaron los valores obtenidos de consumo de electricidad en la simulación de ASPEN PLUS 14.

Tabla 6. Coste de inversión de equipos para la escala 100 L.

| Equipos | Coste de inversión | % del valor del CAPEX |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Reactor para pretratamiento | € 246,758 | 56.12% |
| Autoclave | € 5,000 | 1.14% |
| Fermentador pvc 100 l | € 186,013 | 42.31% |
| Almacenamiento producto | € 700 | 0.16% |
| Almacenamiento materias primas | € 908 | 0.21% |
| Sistema contra incendios | € 281 | 0.06% |
| Total | € 439,676 | 100% |



Tabla 7. Costes operacionales para la escala de 100 L.

| OPEX | Coste operacional anual | % del valor del OPEX |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Mantenimiento | €437.77 | 1% |
| Personal | € 25,000.00 | 60% |
| Capacitación | € 2,500.00 | 6% |
| Servicios de emergencia | €1,000.00 | 2% |
| Material de oficina | €1,000.00 | 2% |
| Seguros | € 65.67 | 0% |
| Laboratorio externos | € 1,000.00 | 2% |
| Prevención de impactos ambientales | €7,000.00 | 17% |
| Prevención de riesgos laborales | €1,000.00 | 2% |
| Servicio técnico | € 1,000.00 | 2% |
| Coste de la energía | € 1,939.46 | 5% |
| Total | €41,937.15 | 100% |



Tabla 8. Coste de inversión de equipos para la escala de 1,000 L.

| Equipos | Coste de inversión | % valor del CAPEX |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Reactor para pretratamiento | € 485,805 | 55.71% |
| Autoclave | € 60,000 | 6.88% |
| Fermentador pvc 1000 l | € 322,517 | 36.98% |
| Almacenamiento producto | € 1,293 | 0.15% |
| Almacenamiento materia prima | € 1,697 | 0.20% |
| Sistema contra incendios | € 525 | 0.06% |
| Total | € 872,099 | 100% |

Tabla 9. Costes de operación para la escala de 1,000 L.

| OPEX | Coste de operación anual | %valor del OPEX |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Mantenimiento | € 868.32 | 2% |
| Personal | € 25,000.00 | 58% |
| Capacitación | €2,500.00 | 6% |
| Servicios de emergencia | € 1,000.00 | 2% |
| Material de oficina | € 1,000.00 | 2% |
| Seguros | € 130.25 | 0.3% |
| Laboratorios externos | € 1,000.00 | 2% |
| Prevención de impactos ambientales | € 7,000.00 | 16% |
| Prevención de riesgos laborales | € 1,000.00 | 2% |
| Servicio técnico | €1,000.00 | 2% |
| Coste de la energía | € 2,850.85 | 7% |
| Total | €43,343.43 | 100% |

Tabla 10. Coste de inversión de equipos para la escala de 100,000 L.

| Equipos | Coste de inversión | %valor del CAPEX |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Reactor para pretratamiento | € 5,423,801 | 71.83% |
| Fermentador pvc 1000l | € 2,094,543 | 27.74% |
| Almacenamiento producto | € 12,029 | 0.16% |
| Almacenamiento materia prima | € 15,788 | 0.2% |
| Sistema contra incendios | € 4,886 | 0.06% |
| Total | € 7,551,049 | 100% |



Tabla 11. Costes de operación para 100,000 L.

| OPEX | Coste de operación anual | %valor del OPEX |
|------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Mantenimiento | € 7,518.34 | 8% |
| Personal | € 25,000.00 | 26% |
| Jefe de planta | € 30,000.00 | 31% |
| Capacitación | € 5,500.00 | 6% |
| Servicios de emergencia | € 2,000.00 | 2% |
| Material de oficina | €1,000.00 | 1% |
| Seguros | € 1,127.75 | 1% |
| Laboratorio externos | €2,000.00 | 2% |
| Prevención de impactos ambientales | € 7,000.00 | 7% |
| Prevención de riesgos laborales | € 1,000.00 | 1% |
| Servicio técnico | € 2,000.00 | 2% |
| Coste de la energía | €11,037.60 | 11% |
| Gestión fracción líquida | € 2,000.00 | 2% |
| Total | € 97,183.70 | 100% |

Tabla 12. Coste de inversión de equipos para la escala industrial de 158,512 L.

| Equipos | Coste de inversión | %valor del CAPEX |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Reactor para pretratamiento | € 8,402,380 | 75.51% |
| Fermentador pvc 1000l | € 2,676,640 | 24.05% |
| Almacenamiento producto terminado | € 17,726 | 0.16% |
| Almacenamiento materia prima | € 23,265 | 0.21% |
| Sistema contra incendios | € 7,201 | 0.06% |
| Total | € 11,127,214 | 100% |



Tabla 13. Costes de operación para escala industrial de 158,512 L.

| OPEX | Coste de operación anual | %valor del OPEX |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------|
| Mantenimiento | €11,079.02 | 10.39% |
| Personal | €25,000.00 | 23.43% |
| Jefe de planta | € 30,000.00 | 28.12% |
| Capacitación | € 5,500.00 | 5,16% |
| Servicios de emergencia | € 2,000.00 | 1.87% |
| Material de oficina | € 1,000.00 | 0.94% |
| Seguros | € 1,661.85 | 1.56% |
| Laboratorios externos | € 2,000.00 | 1.87% |
| Prevención de impactos ambientales | € 7,000.00 | 6.56% |
| Prevención de riesgos laborales | € 1,000.00 | 0.94% |
| Servicio técnico | € 2,000.00 | 1.87% |
| Coste de la energía | € 15,271.31 | 14.31% |
| Gestión fracción líquida | €3,170.25 | 2.97% |
| Total | € 106,682.44 | 100% |

Considerando los valores de los costes de operación y de inversión de los 4 escenarios analizados se puede determinar el flujo de caja esperada para cada escenario considerando los caudales de salida de biohidrógeno generado en cada caso y multiplicando por los valores de venta de 7.5 €/kg de hidrógeno producido como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Ingresos, OPEX y flujo de caja de producción de biohidrógeno para cuatro escenarios.

| Volumen reactor fermentación (l) | Ingreso anual | Costes operacionales anuales | Flujo de caja anual |
|----------------------------------|---------------|------------------------------|---------------------|
| 100 | € 145.36 | € 41,937.15 | -€ 41,791.79 |
| 1,000 | €1,438.81 | € 43,349.43 | -€ 41,910.62 |
| 100,000 | €145,361.23 | € 97,183.70 | € 48,177.53 |
| 158,512 | € 230,416.07 | €106,682.44 | € 123,733.63 |



De estos resultados podemos observar que las escalas de 100 L y 1,000 L no pueden ser viables económicamente debido a que su flujo de caja es negativo al presentar mayores OPEX que ingresos. Por otra parte, las escalas industriales observadas de 100,000 L y 158,512 L están generando un flujo de caja positivo con lo cual el proceso podría ser económicamente viable. En la Tabla 15 se muestra el % de CAPEX financiado a lo largo de la vida útil del proyecto, así como su VAN.

Tabla 15. Viabilidad económica de producción de biohidrógeno para las escalas industriales.

| Escenario | OPEX | Ingresos | CAPEX | % del CAPEX financiado en 20 años | VAN |
|-----------|-----------|----------|-------------|--------------------------------------|-------------|
| 100,000 L | € 97,183 | €145,361 | €7,561,049 | 12.76% | -€6,650,738 |
| 158,512 L | € 106,682 | €230,416 | €11,127,214 | 22.23% | -€8,814,959 |

Considerando los valores presentados en la Tabla 15, se estima que, en el escenario de 100,000 L, el periodo de recuperación de la inversión es de 157 años aproximadamente. Por otra parte, en el escenario de 158,512 L, este periodo asciende a 90 años.

Estos resultados son consistentes con los encontrados en estudios económicos similares [20, 21]. No obstante, cabe resaltar que, debido al tipo de sustrato utilizado en este caso, se obtienen rendimientos menores comparados con los que se podrían obtener al utilizar un sustrato de alta calidad o que favorezca la producción de hidrógeno. Esto conlleva a resultados económicos menos favorables a los que se podrían obtener al utilizar un sustrato diferente. De igual manera, con relación a la producción de biohidrógeno a partir de restos de pan [20], se observa un retorno de inversión de 26.75% para 5 años, para una planta de estructura similar. Sin embargo, en este caso se consideró un valor de venta de hidrogeno de 2.7 USD por m³ de hidrogeno, lo cual genera un impacto significativo en los cálculos económicos realizados en comparativa con este estudio, como se muestra en la Tabla 16.



Tabla 16. Cálculos económicos con precio de venta ajustado a literatura [20].

| Escenario | Ingresos anuales | VAN |
|-----------|------------------|-----------------|
| 100 L | € -41,548.70 | € -1,216,112.26 |
| 1,000L | € -37,594.18 | € -1,574,636.20 |
| 100,000 L | € 484,261.23 | € 1,498,516.94 |
| 158,512 L | € 814,981.85 | € 4,102,648.07 |

Se puede observar que al considerar el precio de venta más elevado (2.7 USD por m³ de hidrogeno) se llegaría a obtener resultados económicos positivos para los rendimientos encontrados en este estudio. Sin embargo, el valor de venta de 2.7 USD por m³ no es un valor que se pueda considerar realista en la actualidad.

De igual manera, con los datos obtenidos en este estudio se estima que la TIR del proyecto a 20 años para la escala de 100,000 L sería de -14.7% y para la de 158,500 L es de -11.39% (Tabla 17). Podemos encontrar que si en el futuro el proceso llegara a ser 3.05 veces más eficiente y la tasa de producción de hidrógeno fuera mayor por esa magnitud o si el costo del hidrogeno fuera 3.05 veces mayor se podría determinar que el proceso llegaría a ser rentable a la escala industrial. Este valor aumenta considerablemente conforme disminuye la escala del proceso, hasta llegar a 450 veces el rendimiento actual en la escala de 100 litros como se muestra en los resultados en la Tabla 17.

Tabla 17. Análisis económico con mejoras de eficiencia.

| Escenario | Caudal de hidrogeno (l/h) | Aumento del rendimiento requerido | Ingresos anuales | VAN | TIR |
|-----------|---------------------------|-----------------------------------|------------------|-----|-------|
| 158,512 L | 118,742.29 | 3.04 | € 595,440.72 | € 0 | 18.68 |
| 100,000 L | 84,771.92 | 3.45 | € 404,072.70 | € 0 | 18.68 |
| 1,000l | 15,223.69 | 62.56 | € 46,668.30 | € 0 | 18.68 |
| 100l | 11,072.37 | 450.05 | € 23,528.02 | € 0 | 18.67 |



5. Conclusiones

En la actualidad las tecnologías de producción de biohidrógeno a partir de bagazo de cerveza aún se encuentran en desarrollo e investigación. Considerando los valores obtenidos del análisis experimental realizado en la Universidad de Valladolid, se pudo llevar a cabo un análisis económico para determinar las escalas en las que el proceso de producción de biohidrógeno usando bagazo como sustrato a través de fermentación oscura es viable.

Los resultados evidencian que las plantas a escala “demo” de 100 L y 1,000 L de reactor no son económicamente factibles debido a que sus costos operacionales son mayores a los ingresos que se podrían obtener por la venta del biohidrógeno. Por otra parte, en una escala industrial se podría llegar a un estado en el cual los costes operacionales sean menores a los ingresos proyectados del proceso. Por lo tanto, se puede obtener un flujo de caja anual positivo. Sin embargo, al considerar los elevados costos de inversión inicial requeridos para la construcción de la planta e instalación de los equipos se obtiene un valor actual neto negativo por lo que, tampoco es viable económicamente el proceso.

Si bien estos resultados muestran que el proceso no se puede considerar económicamente viable en la actualidad, hay que considerar más factores aparte de los factores económicos intrínsecos del proceso. En primer lugar, se tendría que considerar que si se fuera a realizar el proceso en una industria cervecera esta sería una alternativa a la gestión tradicional del residuo del bagazo utilizado, el cual conlleva costes que serían evitados. De igual manera, se deben considerar los posibles beneficios fiscales y subsidios gubernamentales que pueda traer este proyecto para una empresa ya que se estarían produciendo combustibles limpios que no generan gases de efecto invernadero al igual que ser la valorización de un residuo industrial. Finalmente, se pueden considerar los beneficios sociales y de marketing que conlleve este proyecto para una empresa que opte por esta alternativa debido a que les ayudaría a ser una empresa Net Zero si optan por utilizar el biohidrógeno generado para su consumo eléctrico.

En conclusión, si bien el proceso de transformación de bagazo de cerveza en biohidrógeno no se puede considerar económicamente viable por sí solo, optar por invertir en este proceso para la gestión y valorización del residuo en cuestión podría traer ventajas a empresas que van más allá de los costes de inversión y operación del proceso.



Como parte final de las conclusiones, considerando los resultados de este trabajo, a continuación, se detallan algunas perspectivas y recomendaciones a considerar para estudios siguientes. Así, se tienen que considerar las mejoras continuas e investigaciones relacionadas al proceso de producción de biohidrógeno mediante fermentación oscura ya que futuras innovaciones en estos procesos tendrán repercusiones en la factibilidad económica del proceso. De igual manera, cabe resaltar la importancia de los factores económicos considerados en este estudio, puesto que, al cambiar las situaciones económicas europeas, los costes de venta del hidrógeno o la oferta y demanda del mercado energético esto tendría repercusiones en los resultados de cualquier análisis económico realizado. Finalmente, cabe resaltar la posibilidad de realizar una comparativa de diferentes métodos de producción de biohidrógeno con este sustrato o una comparativa de otros productos que se puedan generar con el mismo sustrato. Esto con la finalidad de determinar la vía de valorización del bagazo de cerveza que puede resultar más económicamente factible.



Bibliografía

- (1) Kangyin Dong, Gal Hochman, Yaqing Zhang, Renjin Sun, Hui Li, Hua Liao, CO2 emissions, economic and population growth, and renewable energy: Empirical evidence across regions, *Energy Economics*, Volume 75, 2018, Pages 180-192.
- (2) Ritchie, H.; Roser, M.; and Rosado, P. (2022) - "energy". Published online at OurWorldInData.org. Disponible en <https://ourworldindata.org/energy-mix#:~:text=Globally%20we%20get%20the%20largest,than%2080%25%20of%20en>
- (3) Smith, K.A. and Searchinger, T.D. (2012), Crop-based biofuels and associated environmental concerns. *Glob. Change Biol. Bioenergy*, 4: 479-484.
- (4) Mehmet Melikoglu, Asli Tekin, Biohydrogen production from food and agricultural wastes: A global review and a techno-economic evaluation for Turkey, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 62, 2024.
- (5) (S&P Global) Hydrogen fever in EU puts 2024 target of 6-GW electrolyzer capacity in reach
- (6) Canales, C. (Ed.). (2009). *Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector de elaboración de Malta*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- (7) Chandan Mahata, Suman Dhar, Subhabrata Ray, Debabrata Das, Biohydrogen production from starchy wastewater in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor: Possibilities toward circular bioeconomy, *Environmental Technology & Innovation*, Volume 30, 2023, 103044
- (8) P. Hallenbeck and D. Ghosh. "Advances in fermentative biohydrogen production: The way forward?". *Trends in Biotechnology*. Vol. 27, Issue 5, pp. 287-297. 2009.
- (9) K.Y. Show, D.J. Lee and J.S. Chang. "Bioreactor and process design for biohydrogen production". *Bioresource Technology*. Vol. 102, Issue 18, pp. 8524-8533. 2011.
- (10) Jaswinder Singh, Management of the agricultural biomass on decentralized basis for producing sustainable power in India, *Journal of Cleaner Production*, Volume 142, Part 4, 2017.
- (11) Muhammad Shahbaz, Tareq Al-Ansari, Muhammad Aslam, Zakir Khan, Abrar Inayat, Muhammad Athar, Salman Raza Naqvi, Muahammad Ajaz Ahmed, Gordon McKay, A state of the art review on biomass processing and conversion technologies to produce hydrogen and its recovery via membrane separation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 30, 2020.
- (12) Wen-Hsing Chen, Shen-Yi Chen, Samir Kumar Khanal, Shihwu Sung, Kinetic study of biological hydrogen production by anaerobic fermentation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 31, Issue 15, 2006.



- (13) S. Venkata Mohan, Y. Vijaya Bhaskar, P. Murali Krishna, N. Chandrasekhara Rao, V. Lalit Babu, P.N. Sarma, Biohydrogen production from chemical wastewater as substrate by selectively enriched anaerobic mixed consortia: Influence of fermentation pH and substrate composition, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 32, Issue 13, 2007.
- (14) Chaoyang Lu, Huan Zhang, Quanguo Zhang, Chen-yeon Chu, Nadeem Tahir, Xumeng Ge, Yanyan Jing, Jianjun Hu, Yameng Li, Yang Zhang, Tian Zhang, An automated control system for pilot-scale biohydrogen production: Design, operation and validation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 45, Issue 6, 2020.
- (15) Nanqi Ren, Jianzheng Li, Baikun Li, Yong Wang, Shirui Liu, Biohydrogen production from molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 31, Issue 15, 2006.
- (16) Mi-Sun Kim, Dong-Yeol Lee, Fermentative hydrogen production from tofu-processing waste and anaerobic digester sludge using microbial consortium, *Bioresource Technology*, Volume 101, Issue 1, Supplement, 2010.
- (17) Georgia Antonopoulou, Hariklia N. Gavala, Ioannis V. Skiadas, Gerasimos Lyberatos, Influence of pH on fermentative hydrogen production from sweet sorghum extract, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 5, 2010.
- (18) Ya-Chieh Li, Marika E. Nissilä, Shu-Yii Wu, Chiu-Yue Lin, Jaakko A. Puhakka, Silage as source of bacteria and electrons for dark fermentative hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 20, 2012.
- (19) Hidayet Argun, Fikret Kargi, Photo-fermentative hydrogen gas production from dark fermentation effluent of ground wheat solution: Effects of light source and light intensity, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 4, 2010.
- (20) Wei Han, Yun Yi Hu, Shi Yi Li, Fei Fei Li, Jun Hong Tang, Biohydrogen production from waste bread in a continuous stirred tank reactor: A techno-economic analysis, *Bioresource Technology*, Volume 221, 2016.
- (21) Pritam Kumar Dikshit, Maneesh Kumar Poddar, Sankar Chakma, Chapter 12 - Biohydrogen production from waste substrates and its techno-economic analysis, Editor(s): Antonio Scipioni, Alessandro Manzardo, Jingzheng Ren, *Hydrogen Economy (Second Edition)*, Academic Press, 2023.
- (22) Narasiman Nirmala, Ghodke Praveen, Sharma AmitKumar, PanneerSelvam SundarRajan, Athmanathan Baskaran, Packiyadas Priyadharsini, SivaPerumal SanjayKumar, SelvananthamShanmuganatham Dawn, Kirubanandam Grace Pavithra, Jayaseelan Arun, Arivalagan Pugazhendhi, A review on biological biohydrogen production: Outlook on genetic strain enhancements, reactor model and techno-economics analysis, *Science of The Total Environment*, Volume 896, 2023,
- (23) Barthaas report 2022/2021 <https://www.barthhaas.com/>



- (24) Cimini, Alessio & Moresi, Mauro. (2021). Circular economy in the brewing chain. Italian Journal of Food Science. 33. 47-69. 10.15586/ijfs.v33i3.2123.
- (25) Tablas FEDNA de valor nutritivo de forrajes y subproductos fibrosos húmedos. S. Calsamiglia, A. Ferret, A. Bach, Fundacion para el Desarrollo de la Nutricion Animal. Madrid, 2016. FEDNA, 2016.
- (26) Shashi Kant Bhatia, Sujit Sadashiv Jagtap, Ashwini Ashok Bedekar, Ravi Kant Bhatia, Karthik Rajendran, Arivalagan Pugazhendhi, Christopher V. Rao, A.E. Atabani, Gopalakrishnan Kumar, Yung-Hun Yang, Renewable biohydrogen production from lignocellulosic biomass using fermentation and integration of systems with other energy generation technologies, Science of The Total Environment, Volume 765, 2021.
- (27) Qing Li, Huirong Yang, Teodora Emilia Coldea, Mogens Larsen Andersen, Wanying Li, Haifeng Zhao, Enzymolysis kinetics, thermodynamics and structural property of brewer's spent grain protein pretreated with ultrasound, Food and Bioproducts Processing, Volume 132, 2022.
- (28) Puligundla P, Mok C. Recent advances in biotechnological valorization of brewers' spent grain. Food Sci Biotechnol. 2021
- (29) Buller, L. S., Sganzerla, W. G., Lima, M. N., Muenchow, K. E., Timko, M. T., Forster-Carneiro, T., 2022. Ultrasonic pretreatment of brewers' spent grains for anaerobic digestion: Biogas production for a sustainable industrial development. J. Clean. Prod. 355, 131802.
- (30) Jacobo Pérez-Barragán, Cristina Martínez-Fraile, Raúl Muñoz, Guillermo Quijano, Rafael Maya-Yescas, Elizabeth León-Becerril, Roberto Castro-Muñoz, Octavio García-Depraect, Brewery spent grain valorization through fermentation: Targeting biohydrogen, carboxylic acids and methane production, Process Safety and Environmental Protection, Volume 191, Part A, 2024
- (31) H. Perry, Robert. Manual del ingeniero químico 7ed ; Volumen II. 7th ed. McGraw-Hill, 2001. Print.
- (32) Iea. Global hydrogen review 2021. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>.
- (33) Simon Spillane, The Brewers of Europe, European Beer Trends Statistics Report | 2023 Edition