

**CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA**



CÁTEDRA FUNDACIÓN REPSOL DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA

Descarbonización de la industria

OBSERVATORIO DE DESCARBONIZACIÓN EN LA INDUSTRIA
MEDIDAS DE DESCARBONIZACIÓN EN EL
SECTOR CEVECERO

SITUACIÓN ACTUAL Y VIABILIDAD DE NUEVAS PROPUESTAS

Madrid

Septiembre de 2025

1. INTRODUCCIÓN	2
2. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE CERVEZA EN ESPAÑA	3
2.1. CONTEXTO	3
2.2. OBJETIVO DEL ESTUDIO	3
2.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	3
2.4. METODOLOGÍA.....	5
2.5. ALCANCE	1
2.6. ANÁLISIS DE INVENTARIO.....	2
2.7. RESULTADOS.....	4
2.7.1. La producción de cebada	4
2.7.2. La elaboración de cerveza.....	6
2.8. CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS PASOS.....	9
3. LA BOMBA DE CALOR.....	11
3.1. SITUACIÓN DE PARTIDA Y PROPUESTA.....	11
3.2. PUNTO NOMINAL	12
3.3. PRESTACIONES GENERALES.....	16
3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO	18
4. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	22
4.1. POTENCIAL DEL SECTOR.....	22
4.2. APROVECHAMIENTO	27
4.3. CONCLUSIONES	28
5. REFERENCIAS	30

1. INTRODUCCIÓN

Este informe presenta una exploración de medidas de descarbonización aplicables a la industria cervecera. La exploración presentada en este “observatorio”, llevada a cabo durante el curso 2024/25, ha empleado la siguiente metodología:

- Revisión del estado del arte sobre buenas prácticas y medidas del sector.
- Debate con empresas del sector.
- Investigación propia para llevar a cabo el análisis de viabilidad de las medidas. Dicha investigación se ha elaborado con alumnos del Grado en Tecnologías Industriales de Comillas – ICAI.

El debate con las empresas ha sido principalmente en acceso abierto, a través del [Seminario de la Cátedra](#). En cuanto a la participación de los alumnos, se ha llevado a cabo mediante [Proyectos Fin de Carrera](#) y estudios específicos.

El informe aborda de manera detallada tres áreas en las que ha trabajado de forma específica la Cátedra:

- Análisis medioambiental de la cerveza producida en España. A partir de datos públicos facilitado por la Asociación de Cerveceros se ha desarrollado un análisis de ciclo de vida (ACV), con evaluación de 11 impactos (entre ellos la huella de CO₂). El análisis es de la cuna a la puerta, dejando fuera la distribución del producto. Este análisis aparece descrito en la sección 2 del documento.
- Integración de una bomba de calor de alta temperatura en el proceso de fabricación de la cerveza. Se ha diseñado una bomba de calor transcítica operando con CO₂. La bomba toma calor del mosto que se enfría entre la caldera y la fermentación y cede calor a dos procesos: calentamiento del agua de proceso, a partir del suministro de red, y producción de aceite térmico para la generación de vapor en las calderas. Se ha evaluado la viabilidad técnica y económica para una fábrica tipo y en varios escenarios. Aparece recogido en la sección 3 de este documento.
- Producción de biogás a partir de la EDARi. Se ha analizado el potencial de producción de biogás desde la digestión anaerobia de los lodos de las depuradoras de las fábricas, a nivel nacional, determinando el porcentaje de autoconsumo térmico. También se ha analizado la recuperación de otras corrientes, como en CO₂ del biogás. Este análisis se muestra en la sección 4 de este documento.

2. EVALUACIÓN MEDIOAMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE CERVEZA EN ESPAÑA

2.1. CONTEXTO

La cerveza es una bebida central en la gastronomía española moderna y, por tanto, en la vida social española. En 2024, el consumo de cerveza representaba el 72% del volumen de bebidas alcohólicas consumidas por los españoles, y el 20% de bebidas frías (MAPA, 2025).

Además de participar de la identidad española, tiene importancia socioeconómica: España es el segundo productor europeo de cerveza, y el octavo mundial. Representa el 1,3% del PIB español en 2023 (Cerveceros de España; MAPA, 2025), con una cifra de negocio alcanzando casi el cuarto del total del sector de bebidas (Quesada López, 2025).

La relevancia del sector justifica su participación activa en la senda de transición del país hacia la descarbonización, y más ampliamente, la sostenibilidad. Por ello, Cerveceros de España presentó en 2019 una serie de líneas de acción para mitigar el impacto medioambiental y fomentar la circularidad del sector cervecero (Cerveceros de España, 2019).

2.2. OBJETIVO DEL ESTUDIO

Este estudio evalúa el impacto ambiental de la producción de cerveza en una planta industrial en España mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), considerando todas las etapas desde el cultivo de las materias primas agrícolas hasta la obtención de la cerveza envasada en la puerta de fábrica (*cradle-to-gate*). El análisis tiene como objetivo identificar las etapas con mayor contribución al impacto y evaluar el efecto potencial de nuevas estrategias de descarbonización orientadas a la reducción de emisiones. Se analizaron 11 categorías de impacto, entre las que se encuentra el Potencial de Calentamiento Global (también conocida como huella de carbono), el Potencial de Agotamiento Abiótico y el Potencial de Agotamiento Abiótico de Combustibles Fósiles, el Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono, el Potencial de Oxidación Fotoquímica, el Potencial de Acidificación, el Potencial de Eutrofización junto con diferentes categorías de ecotoxicidad: humana, acuática de agua dulce, acuática marina y terrestre.

2.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se desarrolló para evaluar el impacto medioambiental a lo largo de la vida de un sistema como un proceso, una organización, un servicio o un producto. Se rige según los estándares internacionales ISO 14040:2006 (ISO, 2006a) y ISO 14044:2006 (ISO, 2006b).

La Figura 2.1 resume las diferentes fases que componen esta metodología y el proceso iterativo que la sostiene. Las fases son las siguientes:

- **Definir el objetivo y el alcance.** Se definen las fronteras del sistema que se estudiará para un fin definido. Según el objetivo fijado, se escoge una unidad funcional que permite analizarlo. Por ejemplo, una unidad posible para estudiar la elaboración de la cerveza es el hectolitro de cerveza.
- **Análisis de inventario (*Life Cycle Inventory*).** Se recopilan todos los flujos físicos, entrantes y salientes, entre el sistema y su entorno (el resto del mundo que queda

fuera de las fronteras). Estos flujos abarcan flujos energéticos, materiales y de emisiones al ambiente. Todos los flujos se miden en función de la unidad funcional. Los flujos resultantes se llaman flujos elementales (*elementary flows*). Por ejemplo, la cantidad de cebada consumida en la producción de cerveza se mide en kilogramos por hectolitro de cerveza (kg/hL).

- **Evaluación de impacto (*Life Cycle Assessment*).** Se evalúa cuantitativamente el impacto medioambiental del sistema definido relativamente a la unidad funcional. Esta etapa cuenta con 5 fases, de las cuales sólo las tres primeras son obligatorias (ISO, 2006a).
 - **Selección de categorías de impacto: según el objetivo definido.** Por ejemplo, si se desea estudiar la huella de carbono de la producción de cerveza, se elige el potencial de calentamiento global a 100 años (GWP 100 years).
 - **Clasificación.** Los flujos elementales se asocian a las categorías de impacto a las cuales contribuyen. Siguiendo el ejemplo, el consumo de gas natural en la caldera de la cervecera contribuye al potencial de calentamiento global, tanto por las emisiones de la combustión como por las emisiones fugitivas de metano aguas arriba.
 - **Caracterización.** Se cuantifica el impacto de cada flujo elemental en cada categoría de impacto seleccionada. De allí, se suma para dar el impacto total relativo a la unidad funcional definida. En el caso de la cerveza, se calculan las emisiones equivalentes en dióxido de carbono (CO₂-eq) del consumo de gas natural por hectolitro de cerveza producido.
 - **Normalización.** Se traduce el impacto cuantificado relativamente a una referencia conocida. Aquí, se puede traducir la huella de carbono del hectolitro de cerveza en el equivalente de huella de carbono medio de una persona en España.
 - **Ponderación.** Se definen pesos para cada categoría de impacto para poder sumar los impactos cuantificados en un único número. En este estudio se podría asignar un peso a cada una de las 11 categorías para calcular una magnitud única. Sin embargo, este estudio no ha incluido esta etapa, ni la de normalización.
- **Interpretación.** Se contesta a la problemática inicial del estudio analizando y comparando los resultados a casos conocidos, por ejemplo.

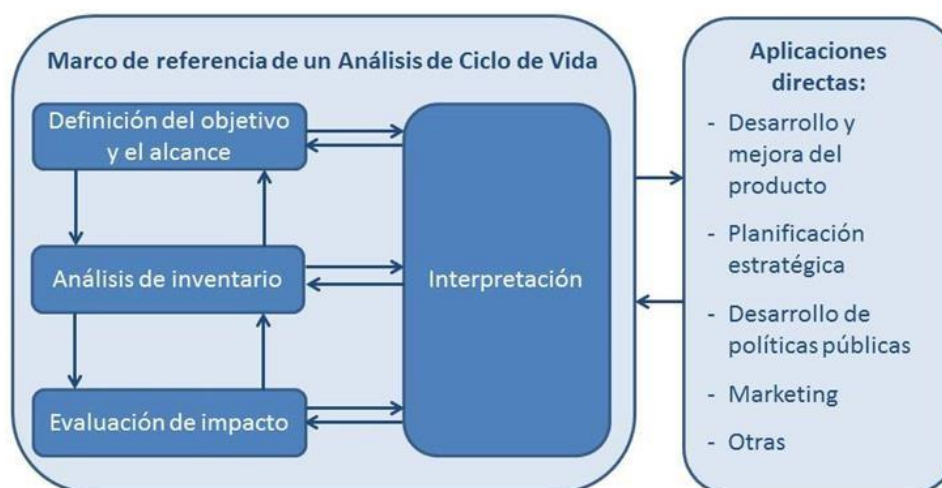


Figura 2.1. Fases a seguir para la realización de un análisis de ciclo de vida (ISO 14040:2006)

2.4. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este ACV, se ha utilizado el software SimaPro 9.5 y la base de datos Ecoinvent APOS 3.8. El método de evaluación del impacto medioambiental empleado es CML-IA baseline V3.09.

Este análisis de ciclo de vida se considera de la cuna a la puerta, es decir, desde la producción de las materias primas, hasta la cerveza envasada lista para distribuir. Existen muchos tipos de cerveza, con distintas materias primas, distintos procesos y diferentes envases. Con el fin de que los resultados obtenidos sean lo más representativos posibles del sector cervecero en España, se ha elegido modelar el proceso de elaboración de cerveza rubia en una fábrica industrial y en los envases más representativos. Los envases seleccionados son los más comunes del mercado español: botella de vidrio de 33 cL de uso único, botella de vidrio de 33 cL retornable, lata de aluminio de 33 cL de uso único, barril de acero de 30 L.

La Figura 2.2 representa los sistemas considerados en la evaluación del proceso de elaboración de la cerveza. Se ha dividido en varias fases:

- (1) **La producción de las materias primas de la bebida de cerveza:** cebada, maíz y lúpulo. Es decir, su cultivo, cosecha y transporte hasta el punto de consumo (la maltería para la cebada y la cervecera para los demás).
- (2) **El malteado:** la transformación de la cebada en malta de cebada.
- (3) **La producción de los materiales auxiliares:** producción y transporte hasta el consumidor (la cervecera).
- (4) **La consecución de los suministros energéticos y de agua:** producción y distribución de los suministros básicos (*utilities*) que son la electricidad, el gas natural, el biogás y el agua.

Fronteras del sistema

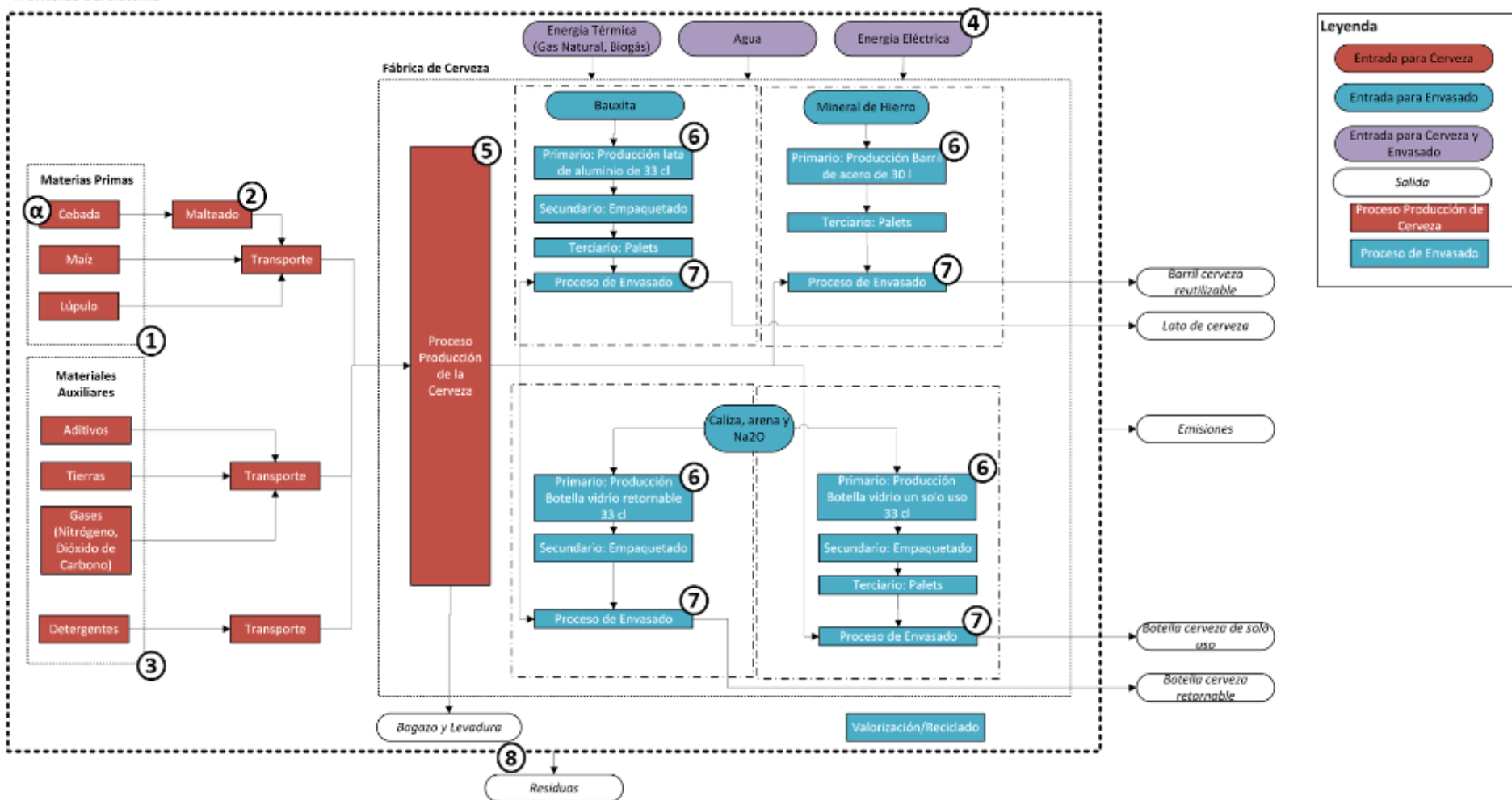


Figura 2.2. Sistema estudiado: de la cuna a la puerta.

- (5) **La producción de la cerveza:** el conjunto de procesos que convierten las materias primas en cerveza sin envasar (maceración, ebullición, fermentación y maduración).
- (6) **La producción de los varios tipos de envases:** tomando el ejemplo de la botella de vidrio de 33 cL de uso único, correspondería a la producción de la botella de vidrio, así como de la etiqueta y del tapón. Además, se incluye la producción de los envases secundarios (el material para el pack de 24 botellas) y terciario (el pallet para transportar varios packs de 24 botellas). Esta fase incluye el transporte de las materias primas y de los envases hasta su punto de consumo.
- (7) **El envasado de la cerveza:** el relleno del envase y la pasteurización de la cerveza. Para los envases reutilizables (botella de vidrio o barril de acero), se incluye la limpieza del envase devuelto que conlleva un mayor consumo de agua y energía.
- (8) **Los subproductos y el tratamiento de los residuos:** los subproductos de la producción de la cerveza se representan como créditos de impacto medioambiental. En este estudio, sólo se modelizó el bagazo – la fase sólida que sale de la etapa de elaboración del mosto (maceración y ebullición) – ya que representa la mayoría de la masa de subproductos generados en una cervecera (Ortiz et al., 2019). Al usarse habitualmente como pienso animal (Mussatto, 2014), se supone que evita el impacto medioambiental de la producción de pienso basado en cebada.

El cultivo y la cosecha de la cebada (α en la Figura 2.2), se modelizó *ad hoc* para analizar los parámetros específicos del sector agrícola. Este análisis más detallado se justificó por el peso significativo de la cebada en el impacto medioambiental de la producción de la cerveza, como se desprende de los resultados expuestos más adelante. Se ha utilizado un modelo existente en la base de datos Ecoinvent para la elaboración de la cerveza.

2.5. ALCANCE

2.5.1. La producción de cebada

El análisis de ciclo de vida de la cebada se considera de la cuna al grano en la parcela (resultante de la cosecha). La unidad funcional seleccionada es la hectárea de cebada cervecera con un rendimiento medio de 6.000 kg de grano/ha. El sistema estudiado (la parcela) está ubicado en España en el año 2021. El alcance temporal se fijó para conservar coherencia con los datos disponibles para el ACV de la cerveza.

Las fases consideradas en este ACV de la cebada son:

- **Consumo de los fertilizantes:** incluye la producción y el transporte hasta el punto de consumo del NPK de presembrado y de dos aplicaciones de nitrógeno en cobertera.
- **Producción de las semillas de siembra.** Producción y transporte de las semillas producidas para la siembra.

- **Amortización de la maquinaria** (tractor, cosechadora y aperos). Emisiones debidas a la fabricación de la maquinaria empleada para la producción de la cebada.
- **Riego de la cebada por aspersión.** Captación, transporte y aspersión del agua en la parcela.
- **Incorporación de la paja al suelo.** Se considera que al cosechar la cebada la paja se deja en el terreno, lo que permite fijar aproximadamente un 10% del carbono contenido en ella y contribuye a la reducción de emisiones de CO₂.
- **Aplicación de los fertilizantes y descomposición de la paja.** Emisiones de CO₂-eq provenientes del ciclo del nitrógeno en la tierra, así como de la descomposición de la paja en el suelo.
- **Gasóleo.** Emisiones debidas a la producción y distribución del gasóleo, más las emisiones de la combustión del mismo en el tractor y cosechadora.

2.5.2. La elaboración de cerveza

Como ya se ha adelantado, el ACV de la elaboración de la cerveza abarca un sistema que va de la cuna a la salida de la fábrica con la cerveza envasada. La Figura 2.2 muestra los límites del sistema y recoge todas las fases consideradas dentro del estudio. Las fases están enumeradas más arriba en la descripción del esquema. La unidad funcional seleccionada es el hectólitro de cerveza rubia producido en España en 2021. Se eligió ese año por los datos a nuestra disposición.

Como se desprende de los resultados mostrados más adelante, el envase tiene un peso significativo en el impacto medioambiental total de la cerveza envasada. Por tanto, se han estudiado y comparado los tres tipos de envases que dominan el mercado español de la cerveza: la botella de vidrio (39,1% del volumen de ventas en 2021), la lata (40,7%) y el barril (20,2%) (Cerveceros de España, MAPA, 2025). Para valorar las medidas de circularidad de los envases presentados en el plan de la asociación cervecera española (Cerveceros de España, 2019), se ha elegido estudiar la botella de vidrio de uso único y la botella de vidrio reutilizable.

Los cuatros envases estudiados son: la botella de vidrio de 33 cL de uso único, la botella de vidrio de 33 cL retornable, la lata de aluminio de 33 cL de uso único, el barril de acero de 30 L. Para poder comparar sus impactos respectivos, se utiliza la unidad funcional del hectólitro de cerveza rubia envasada.

2.6. ANÁLISIS DE INVENTARIO

2.6.1. La producción de cebada

La modelización del ciclo de vida de la producción de cebada se ha basado en una serie de fuentes técnicas y científicas:

- El protocolo de cultivo y técnicas saludables de Malteros y Cerveceros de España para definir los supuestos de fertilización (dosis y número de aplicaciones) y de siembra (dosis).
- La guía de cebada en aspersión itg agrícola para definir los parámetros de riego (dosis y labores).

- La plataforma de conocimiento de la maquinaria del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación para fijar los parámetros de consumos de gasóleo en las labores y de amortización de la maquinaria.
- La base de datos de Ecoinvent 3.8 para el resto de datos, sobre todo de emisiones (Ecoinvent, 2023).

Se plantearon las siguientes hipótesis para la producción de cebada:

- Cebada de primavera, es decir con riego.
- Un rendimiento medio de 6.000 kg-grano/ha para tierras de regadío).
- Normas de fertilización siguiendo el protocolo de cultivo de Malteros y Cerveceros de España.
- Se considera que la paja se incorpora a la tierra mediante laborar con el fin de enterrarla. Por ello, un 10% del carbono que contiene la paja se supone que acaba siendo humus (materia orgánica estable del suelo) y, por tanto, se descuenta el CO₂ correspondiente.

2.6.2. La elaboración de cerveza

La modelización del ciclo de vida de la elaboración de la cerveza se ha basado en una serie de fuentes técnicas y científicas:

- Informes de organizaciones relevantes: Cerveceros de España y Malteros de España para las materias primas y el proceso de producción de la cerveza; Ecovidrio y European Aluminium para el aluminio; IPCC para los factores de emisión de gases de efecto invernadero; EEA para las emisiones al aire, etc.
- Literatura científica.
- Bases de datos de ACV: Ecoinvent para la mayoría de procesos; WFLDB para procesos específicos al sector agroalimentario como, por ejemplo, el malteado (Nemecek et al., 2019).

Se plantearon las siguientes hipótesis para la elaboración de cerveza:

- **Cerveza:** Cerveza rubia.
- **Materias primas agrícolas:** las ratios de consumo vienen de datos del sector.
 - Cebada: 16,7 kg/hL cerveza
 - Malta: 12,9 kg/hL cerveza, suponiendo 1,3 kg cebada/kg malta como se ha indicado en el proceso de maltería en la base de datos WFLDB (Nemecek et al., 2019).
 - Maíz: 5,4 kg/hL cerveza
- **Envases primarios:**
 - **Botella de vidrio ámbar de 33 cL de uso único**
 - **Botella de vidrio ámbar de 33 cL retornable:** su peso representa un caso medio proveniente de los proveedores típicos del mercado español.
 - **Barril de acero de 30 L retornable:** se fijaron los parámetros (peso, fabricación, material, etc.) a partir de un caso de estudio italiano (Cimini & Moresi, 2016) y otro sueco (Martin et al., 2022).
 - **Lata de aluminio de 33 cL de uso único:** se utilizaron los parámetros de un caso de estudio en Reino Unido (Niero & Olsen, 2016) para modelizar una

lata de aluminio fabricada a partir de aleaciones metálicas habituales en el sector cervecero europeo, adaptados al peso representativo de las latas de cerveza en España (Ecovidrio & Cerveceros de España, 2023).

- **Envasado completo:** Los parámetros para el peso y el material de los envases primarios, secundarios y terciarios de los envases, excepto la botella de vidrio retornable, provienen de un caso de estudio en Italia (Cimini & Moresi, 2016). Para el envasado secundario de la botella de vidrio retornable, se han sacado los datos (peso, número de botellas por caja, material) de los catálogos de proveedores.
- **Circularidad de los envases:**
 - Las tasas de reciclajes elegidas provienen de la base de datos Ecoinvent y generalmente corresponden al caso europeo.
 - Para los envases reutilizables, se divide el impacto medioambiental de su fase de fabricación por el número medio de utilizaciones en la vida del envase: 80 usos para el barril de acero (Ecovidrio & Cerveceros de España, 2023); 20 usos para la botella de vidrio (Tua et al., 2020); 125 usos para el envase secundario de las botellas de vidrio retornable en forma de caja de plástico reutilizable (Ecovidrio & Cerveceros de España, 2023).
- **Transporte:** la contribución del transporte en las varias fases de la cadena de valor se adaptó de la base de datos Ecoinvent.
- **Fase de fabricación de la cerveza:** se ha supuesto un suministro eléctrico 100% renovable (26% solar fotovoltaica y 74% eólica), un suministro térmico a partir de gas natural y autoconsumo de biogás.

2.7. RESULTADOS

2.7.1. LA PRODUCCIÓN DE CEBADA

Los resultados obtenidos mediante la realización del análisis de ciclo de vida de la producción de cebada de primavera están representados en porcentaje en la Figura 2.3 para permitir el análisis comparativo.

Como se puede desprender de los resultados, la producción de fertilizantes (la categoría Consumo de fertilizantes en la Figura 2.3) representa el principal foco de impacto medioambiental negativo en la casi totalidad de las categorías de impacto. Por tanto, un punto importante de mejora sería la substitución de los fertilizantes convencionales procedentes de la industria química por otros fertilizantes: fertilizantes con modos alternativos de liberación de los nutrientes (para reducir las pérdidas de nutrientes y, por ende, el consumo total de fertilizantes); fertilizantes verdes (producción industrial no contaminante); u orgánicos (como los purines o los estiércoles).

El segundo foco de impacto negativo es el riego. Radica en las emisiones vinculadas al sistema de captación, transporte y aspersión del agua, como pueden ser el funcionamiento de las bombas con un grupo electrógeno o la producción de las tuberías (Ecoinvent, 2019).

El tercer foco de impacto negativo son las emisiones de aplicación de los fertilizantes que contribuyen al calentamiento global y la eutrofización – el incremento de la carga orgánica en aguas dulces. Una consecuencia posible de la eutrofización es la aparición de algas

verdes en los ríos causando daños significativos para los ecosistemas acuático y costero (Schindler, 2006).

En la categoría del potencial de calentamiento global, la reincorporación de paja al suelo genera un crédito al fijar carbono y reducir las emisiones de CO₂.

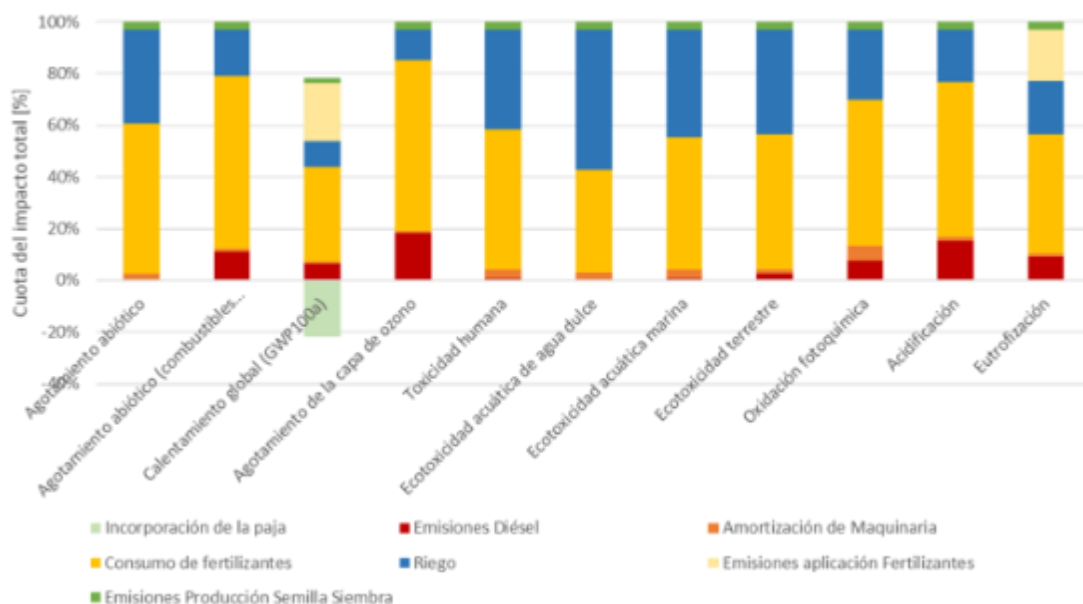


Figura 2.3. ACV de la producción de cebada de primavera en España en 2021.

La Figura 2.4 representa la distribución del potencial de calentamiento global (PCG) entre las fases del proceso de cultivo y cosecha de la cebada. Como se adelantó, la producción de los fertilizantes consumidos es la principal fuente de impacto medioambiental negativo (47% de la huella de carbono total sin incorporar el crédito procedente de la paja). Si se suman las emisiones de la aplicación de los fertilizantes, los fertilizantes son responsables del 76% de la huella de carbono total sin créditos. Añadiendo las otras etapas, principalmente el riego (13%) y las emisiones de operación de la maquinaria (8%), **la huella de carbono de la cebada de primavera es 2,65 t CO₂-eq/ha sin descontar el crédito por la paja. Con el crédito, la huella de carbono baja a 1,90 t CO₂-eq/ha.**

La reincorporación de la paja al suelo fija parte de su carbono, reduciendo las emisiones de CO₂ y disminuyendo un 28% el PCG. Este resultado abre la cuestión del aprovechamiento de la biomasa agrícola (la paja de cebada en este caso) en el marco de la transición hacia una economía descarbonizada. Al tener varias aplicaciones rivales, se tendrá que decidir si es más eficiente para España reducir la huella de carbono de la producción de cebada u otra aplicación como puede ser la producción de electricidad o de biogás. Por supuesto, la reincorporación de la paja no sólo tiene beneficios en cuanto a emisiones, sino también para la calidad del suelo (Thomsen & Christensen, 2004), una dimensión que no está estudiada aquí. El presente análisis se limita en arrojar luz sobre el potencial medioambiental de la práctica de reincorporación de la paja al suelo.

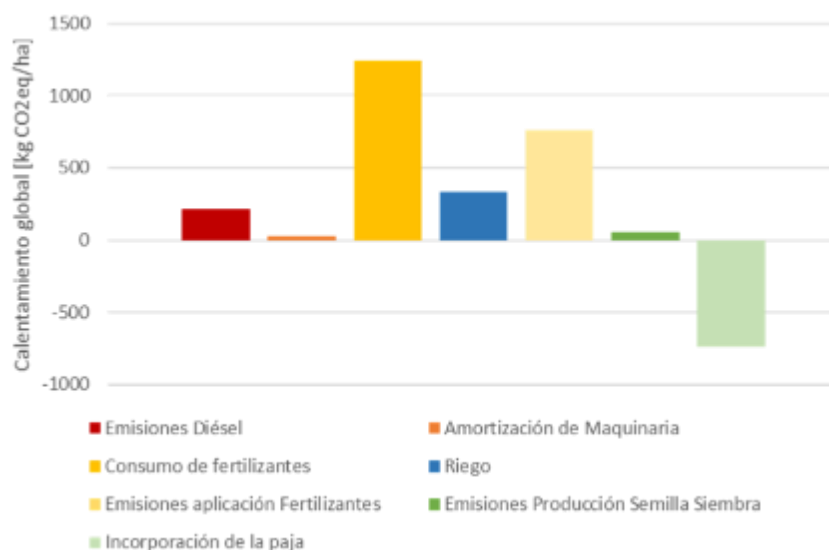


Figura 2.4. Distribución del potencial de calentamiento global de la producción de cebada de primavera en España en 2021.

2.7.2. LA ELABORACIÓN DE CERVEZA

Los principales resultados del análisis de ciclo de vida de la cerveza sin envasado están resumidos en la Figura 2.5. Al igual que en los resultados de la producción de cebada, los resultados están representados en porcentaje para permitir la comparación entre las 11 categorías de impacto. Se desprende que las materias primas agrícolas (malta de cebada y maíz, sobre todo) son el foco principal del impacto medioambiental de la cerveza en todas las categorías. Por el contrario, el impacto del propio proceso de elaboración de la cerveza en la cervecera (energía térmica y electricidad) resulta bastante limitado salvo en la categoría de Potencial de agotamiento de la capa de ozono y el Potencial de agotamiento abiótico de los combustibles fósiles. El último impacto se debe al consumo de gas natural por la caldera de la fábrica.

El bagazo contribuye positivamente porque es habitualmente valorizado como pienso para los animales (Mussatto, 2014). Proporciona un crédito de impacto medioambiental por considerarse que permite evitar la producción de pienso animal a base de grano de cebada. Por ello, los créditos correspondientes suelen ser más significativos donde la cebada contribuye más al impacto medioambiental total. En el caso de la categoría de ecotoxicidad terrestre, estos créditos compensan completamente los impactos negativos del resto de fases y sistemas estudiados.

En la cerveza envasada, el envase constituye un factor de impacto ambiental particularmente significativo. Como se verá en el estudio comparativo de la huella de carbono de los cuatro formatos analizados, el envase suele representar la mayor parte del impacto total. Para ilustrar esta situación, se analiza seguidamente el caso de mayor impacto: la botella de vidrio de 33 cL de uso único.

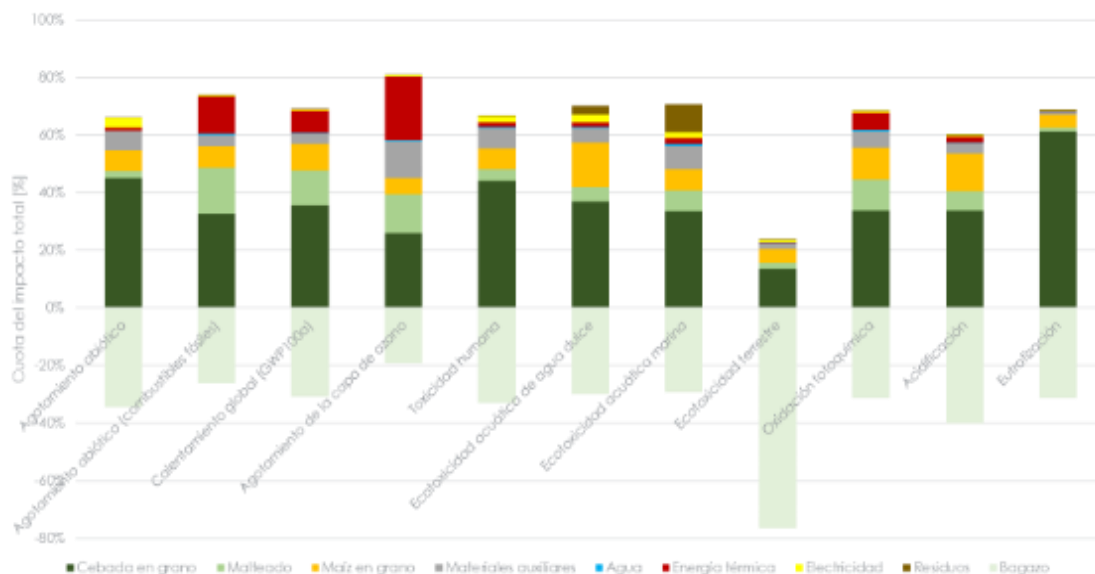


Figura 2.5. ACV de la cerveza sin envasar en España en 2021.

Los resultados de este formato de envase en las 11 categorías están representados en la Figura 2.6. El envase primario (la botella de vidrio, etiquetas, adhesivo y tapón) representa una parte significativa del impacto en cada categoría. Incluso en el caso de menor impacto, el potencial de eutrofización, el envase primario representa en torno a la mitad del impacto (sin créditos). De hecho, en el caso de la ecotoxicidad terrestre, el crédito brindado por el bagazo no permite compensar el impacto adicional del envase primario. El envase secundario (el cartón del pack de 24 botellas) y el envase terciario (el pallet con film plástico) contribuyen en una menor medida. **El mayor peso del envase de vidrio frente a otros tipos se debe a la cantidad requerida por hectolitro de cerveza (54,5 kg/hL), en comparación con la lata de aluminio (3,7 kg/hL) y el barril de acero inoxidable (32 kg/hL).**

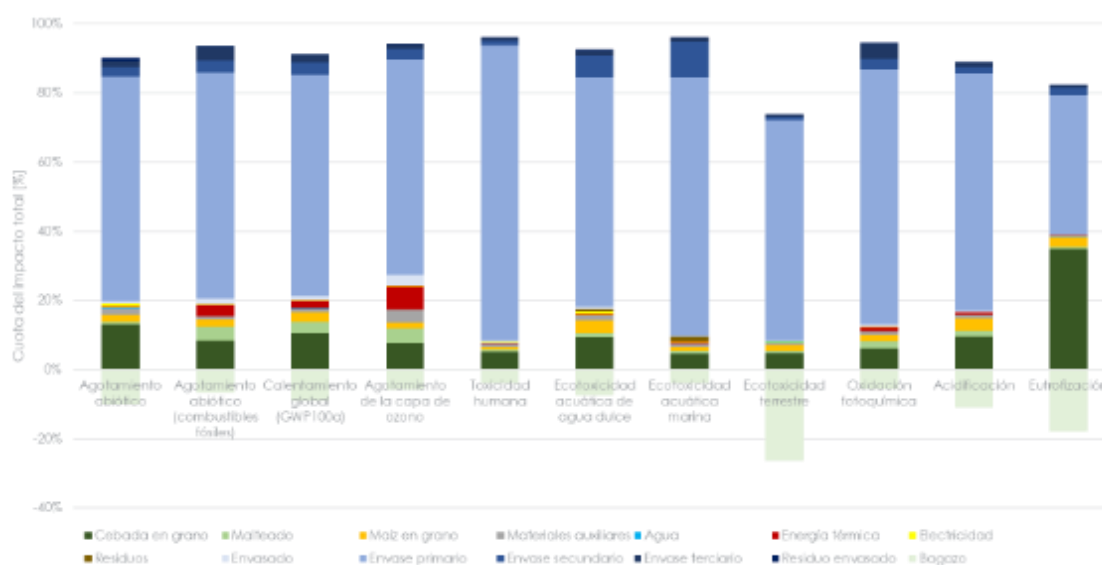


Figura 2.6. ACV de la cerveza envasada en la botella de vidrio de 33 cl de un solo uso en España en 2021.

Esta diferencia en la intensidad material aboca a un menor impacto medioambiental en los otros envases como se puede desprender de la Figura 2.7, donde se comparan sus huellas de carbono respectivas.

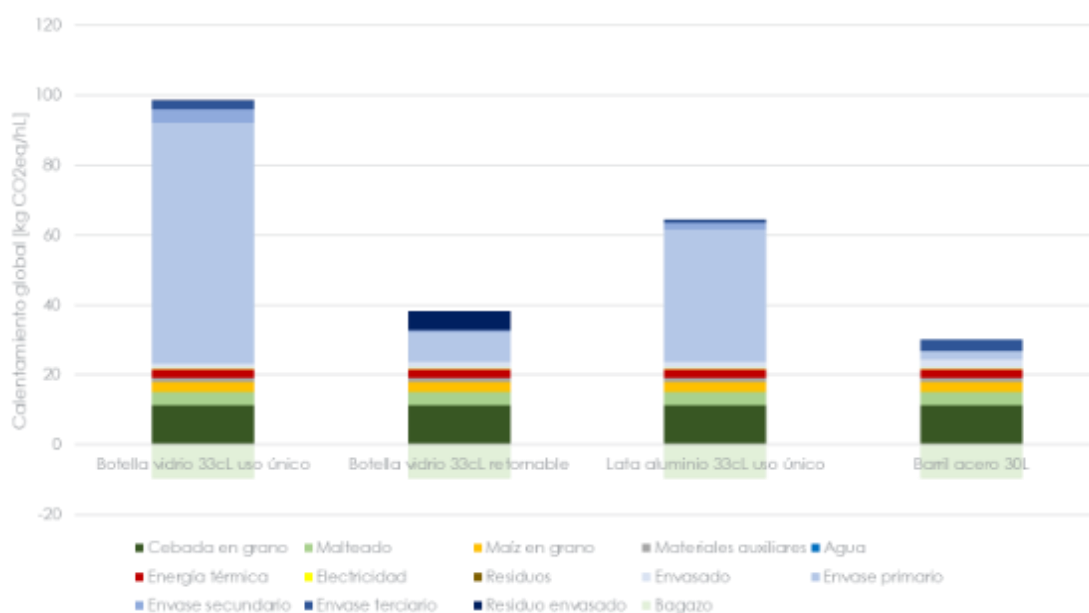


Figura 2.7. Potencial de calentamiento global de 1 hL de cerveza envasada en los cuatro formatos típicos de envases en España en 2021.

Los envases reutilizables (botella y barril) tienen menores huellas de carbono por el número de usos (o rotaciones) a lo largo de su vida útil. Al analizarse la producción de 1 hL de cerveza envasada, se divide el impacto de la producción de los envases primario y secundario entre el número total de usos, lo que explica la menor contribución del envase.

En términos generales, se observa una estructura de impactos relativamente similar entre los distintos formatos de envase. No obstante, en el caso de los envases reutilizables (como las botellas retornables o los barriles), adquieren mayor relevancia tanto los residuos de envase como la fase de envasado dentro de la propia cervecera. Esta diferencia se explica porque los residuos generados en los envases reutilizables se producen en la misma planta —por ejemplo, botellas dañadas o descartadas— y, por tanto, quedan incluidos en los límites del sistema analizado. En cambio, en los envases de un solo uso, los residuos se generan en el punto de consumo, es decir, cuando el consumidor desecha el envase tras su utilización. Al producirse fuera del ámbito de la planta cervecera, dichos residuos no se consideran dentro del alcance del sistema estudiado. Como no se ha tenido en cuenta la logística de distribución aguas abajo y, por tanto, la logística inversa de los envases reutilizables, su ventaja comparativa está sobrevalorada. La integración de esta fase aguas abajo será un próximo paso de este estudio.

Los valores absolutos de la huella de carbono de los cuatro envases, con y sin crédito, están expuestas en la Tabla 2.1. El crédito procedente del bagazo es el mismo en todos los envases ya que se compara el mismo volumen de cerveza (1 hL).

Tabla 2.1. Huellas de carbono de la cerveza envasada en los cuatro formatos típicos de envases en España en 2021

Formato de envase	Sin crédito [kg CO ₂ eq/hL]	Con crédito [kg CO ₂ eq/hL]
<i>Botella vidrio 33cL uso único</i>	98,48	88,78
<i>Botella vidrio 33cL reutilizable</i>	38,24	28,53
<i>Lata aluminio 33cL uso único</i>	64,24	54,53
<i>Barril acero 30L</i>	30,17	20,46

2.8. CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS PASOS

Las principales conclusiones del estudio del análisis de ciclo de vida de la **producción de cebada** son:

- **el fuerte impacto de los fertilizantes**, por su producción en el sector industrial químico y las emisiones de terreno que causan
- **el potencial de la reincorporación de la paja**, para mitigar las emisiones de los otros sistemas y mejorar la calidad del suelo.

Las principales conclusiones del estudio del análisis de ciclo de vida de la **elaboración de la cerveza** son:

- **el fuerte impacto de las materias primas agrícolas en el ciclo de vida de la cerveza sin envasar**: cebada, maíz, malteado de la cebada;
- **el elevado peso en el impacto de los materiales de envase**, sobre todo en el caso del vidrio;
- **el potencial de la reutilización en los envases**, en un marco de economía circular.

Los pasos a seguir para la mejora del análisis de ciclo de vida de la cebada son:

- **un análisis de sensibilidad de la paja en la cebada**, para determinar el impacto de la asignación económica en los resultados finales
- **un estudio de fertilizantes menos contaminantes**, como pueden ser fertilizantes con modos alternativos de liberación, fertilizantes verdes, u orgánicos
- **incorporar las emisiones de fósforo y de potasio al suelo**, que tienen consecuencias significativas para los impactos como la eutrofización. Por ahora, el estudio sólo recoge las emisiones de nitrógeno
- **analizar nuevos protocolos de cultivo**.

Los pasos a seguir para la mejora del ACV de la elaboración de la cerveza son:

- **el análisis de nuevos protocolos de cultivo para las materias primas agrícolas**: la cebada y el maíz. También, se integrará el modelo *ad hoc* de la producción de cebada en el ACV de la cerveza
- **mejorar la modelización de la malta**, que viene, por ahora, de la base de datos WFLDB
- **representar el lúpulo**, que no está incluido, por ahora, por falta de datos. Sin embargo, su peso es mucho menor que las otras materias primas agrícolas, lo que

no debería cambiar significativamente los resultados en cuanto a las materias primas agrícolas

- **incluir y mejorar la representación del transporte**, que ha sido modelado genéricamente aguas arriba con mixes de transporte sacados de la base de datos Ecoinvent. Aguas abajo de la cervecera, el transporte se incluirá para poder analizar mejor el efecto de la reutilización de los envases (menor impacto de la producción a cambio de un mayor impacto del transporte aguas abajo)
- **análisis de medidas de descarbonización y economía circular en los envases**, como pueden ser tecnologías de producción menos intensiva en carbono, mayores tasas de reciclaje, y una mayor tasa de reutilización.

Para estudiar estos nuevos aspectos, se proponen estudiar varias medidas de descarbonización con el planteamiento de escenarios a futuro. Para la producción de cebada, se plantea estudiar las medidas de descarbonización siguientes:

- **nuevas semillas y nuevos protocolos de cultivo**
- **nuevos fertilizantes** (producción y aplicación)
- **biocombustibles** para la maquinaria.

Para los envases utilizados para la cerveza, se plantea estudiar:

- la **descarbonización de la producción de los envases**, mediante electrificación o gases renovables (biogás, biometano, hidrógeno)
- el **reciclado de los envases**
- la economía circular con la **reutilización de los envases**, lo que permitirá arrojar luz sobre la sensibilidad de la medida a la distancia del transporte.

3. LA BOMBA DE CALOR

3.1. SITUACIÓN DE PARTIDA Y PROPUESTA

La Figura 3.1 muestra el esquema energético del proceso productivo en una fábrica de cerveza típica. Por una parte, existen dos demandas térmicas principales: calderas y enfriadora (*chiller*). En las calderas se calienta el agua de proceso y el mosto mediante unas camisas por las que circula vapor. Dicho vapor se produce mediante gas natural o combustibles renovables (biomasa o biogás), siendo el biogás autoproducido en el proceso a partir de la depuradora de aguas residuales industriales (EDARi), como se verá en la sección 4. En cuanto a la enfriadora, ésta refrigera el agua de red, que llega a la planta entre 8 °C y 25 °C para, una vez fría, dirigirse a un recuperador donde enfría al mosto que sale de la caldera, hasta dejarlo a una temperatura adecuada para seguir con el proceso, calentándose ella para a su vez incorporarse al proceso. Este esquema es el habitual en cerveceras, variando principalmente la contribución de combustibles renovables en el aporte de calor a las calderas.

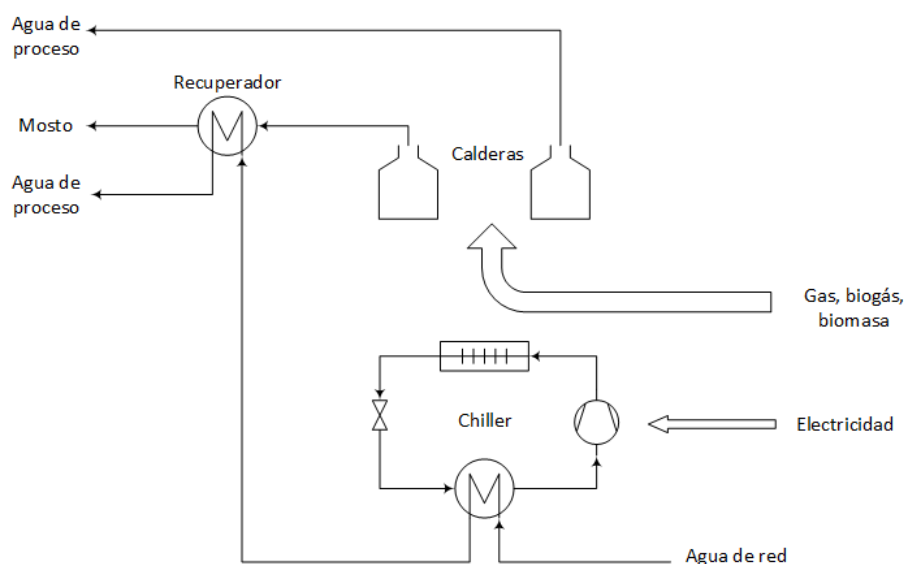


Figura 3.1. Esquema energético convencional en el proceso productivo de la cerveza

A la vista de que el proceso productivo requiere tanto enfriamiento como calentamiento, se ha explorado el uso de una bomba de calor regenerativa¹, es decir, que tanto el foco frío (fuente) como el caliente (sumidero o demanda) intercambien calor útil, según se recoge en la Figura 3.2. En ella se ve que la cesión de calor se ha dividido en dos salidas, una para la producción de vapor, que emplea aceite térmico como fluido caloportador, en previsión de poder almacenarlo ante desajustes del uso de la bomba de calor y la cocción; otra para la producción de agua caliente de proceso, a partir del agua de red. Finalmente, el mosto se enfría a partir del evaporador de la bomba de calor. De este modo, se reemplazan los combustibles por electricidad, que se supondrá de origen renovable, y se evita tener que

¹ Esta sección resume en [trabajo fin de grado desarrollado por Gabriela Calvo Abad](#), donde pueden encontrarse todos los detalles del estudio.

gestionar la condensación del *chiller*, que habitualmente se realiza con torres de enfriamiento, lo que acarrea gestión del agua y de la legionela.

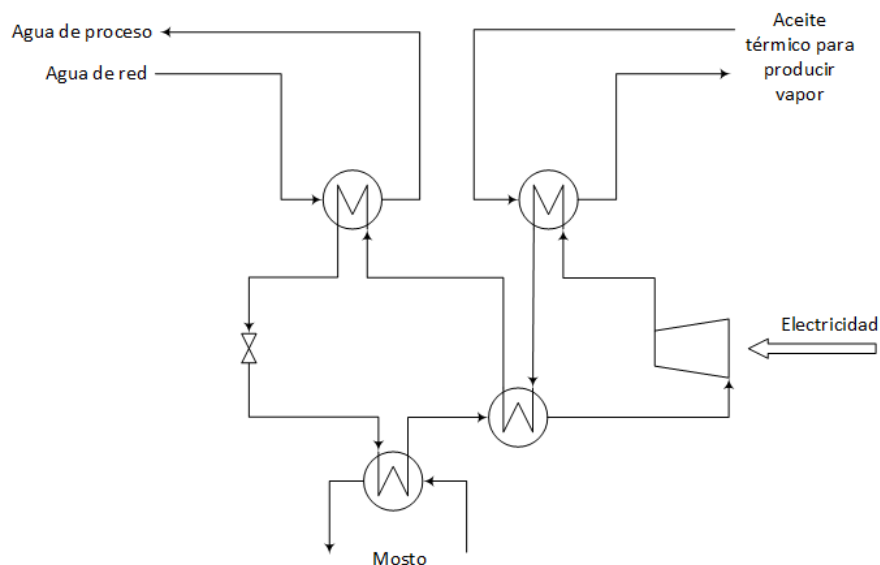


Figura 3.2. Esquema energético de la bomba de calor propuesta para el proceso productivo de la cerveza

3.2. PUNTO NOMINAL

La temperatura del agua de red varía a lo largo de año, habiéndose escogido la dada en la Figura 3.3 como representativa, ya que incluye tres zonas significativas. Se ha tomado 10 °C como temperatura representativa para caracterizar el punto nominal.

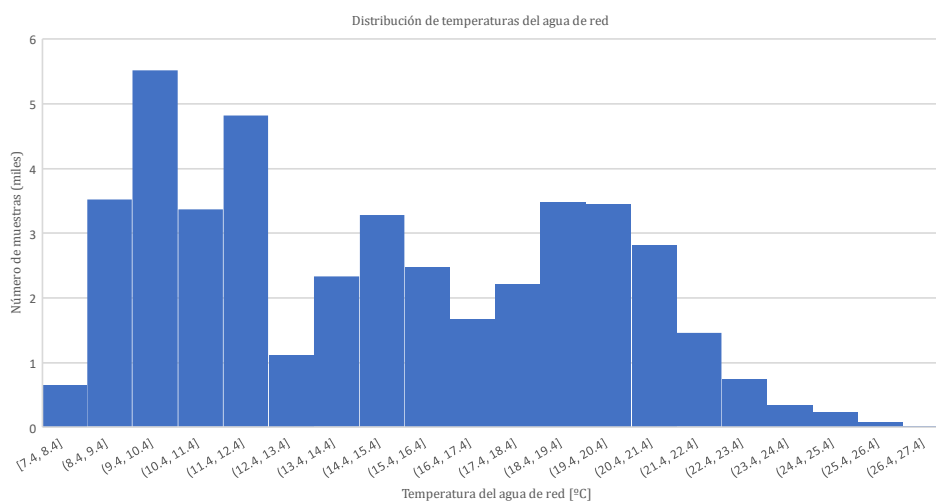


Figura 3.3. Distribución de temperaturas del agua de red supuesta.

La Figura 3.4 muestra el esquema de la bomba de calor propuesta con los valores representativos de las demandas en el punto nominal (10 °C de temperatura del agua de red). Se trata de una bomba de calor de ciclo Rankine inverso regenerativo, utilizando CO₂ (R744) como fluido de trabajo. Dicho fluido se cataloga como *natural*, con un potencial de calentamiento global (GWP) unitario y de agotamiento de la capa de ozono (ODP) nulo, por tanto, sin restricciones ambientales. El diagrama p-h (Figura 3.5) muestra los flujos energéticos (proporcionales a variación de entalpía) de los

intercambiadores y el compresor. Se aprecia la evaporación a 6 °C del CO₂ para lograr una salida del mosto a 10 °C. La alta temperatura de entrada del mosto permite elevar la temperatura del CO₂ antes de que recoja el calor en el recuperador (REG), llevando así una temperatura elevada (164 °C) a la aspiración del compresor, lo que permite impulsar el CO₂ a 300 °C, suficiente para calentar el aceite térmico que posteriormente producirá vapor saturado a 148 °C. Finalmente, el CO₂ calienta el agua de red hasta la temperatura adecuada para el proceso. El diagrama T-s se da en la Figura 3.6.

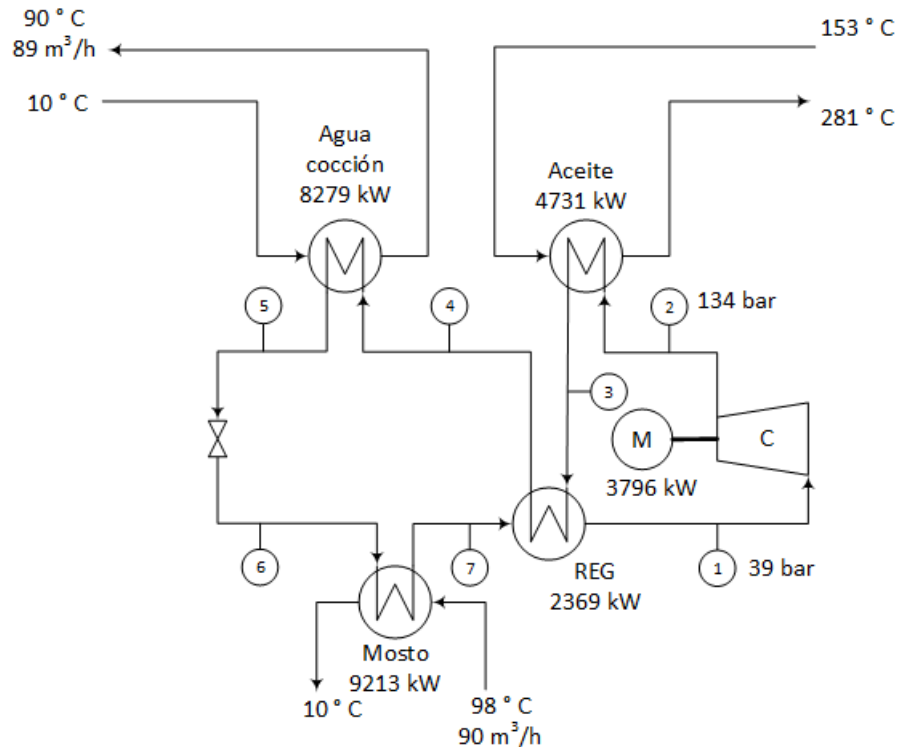


Figura 3.4. Esquema de la bomba de calor con indicación del punto nominal.

A partir de los flujos energéticos mostrados en la Figura 3.4, se pueden obtener las eficiencias de la bomba de calor (en su punto nominal). Así, tomando sólo como efecto útil el calor aportado (tanto al aceite como al agua), el COP es 3.43. Sin embargo, si se incorpora el enfriamiento del mosto al efecto deseado, el COP alcanza 5.85.

La Figura 3.7 muestra los diagramas T-Q de los diferentes intercambiadores, así como su conductancia térmica (UA), que da una idea del tamaño de los mismos, y que será empleada en la estimación del CAPEX. En el evaporador (mosto) se aprecia el tramo de evaporación y sucesivo sobrecalentamiento; en el calentamiento del agua se observa el comportamiento no lineal del CO₂ debido a la proximidad al punto crítico; finalmente, en el recuperador y calentador de aceite se observa un comportamiento convencional debido a que el CO₂ en ellos se asemeja a un gas ideal.

Finalmente, la Figura 3.8 muestra el corte del rodete del turbocompresor.

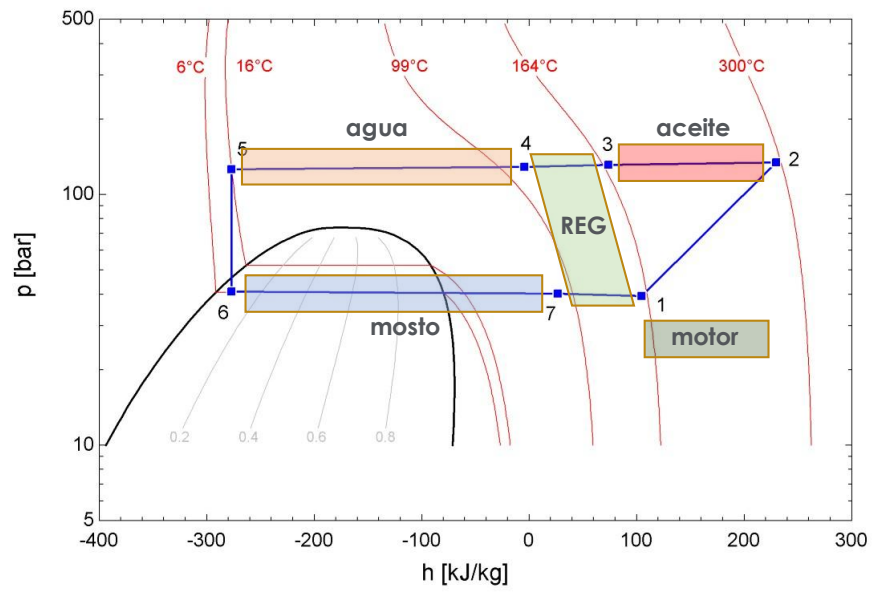


Figura 3.5. Diagrama p-h de la bomba de calor, con indicación de los calores y trabajos.

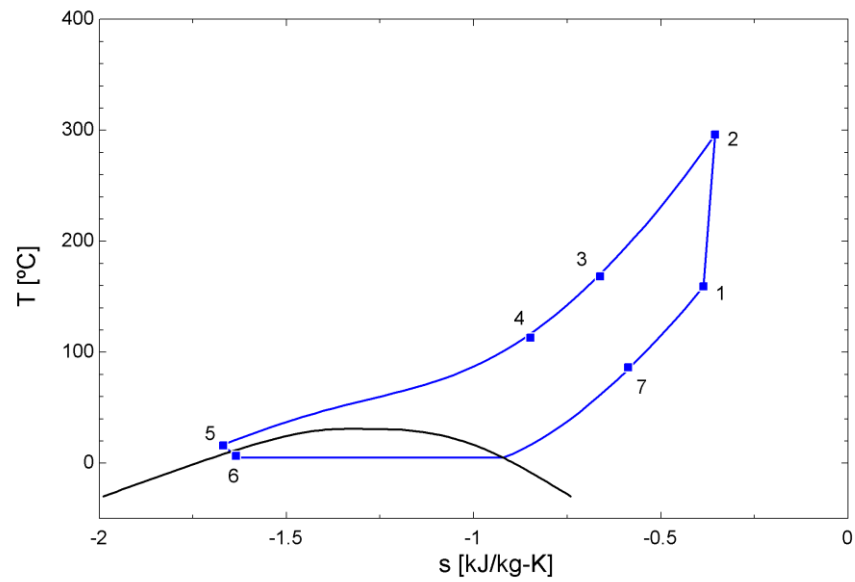
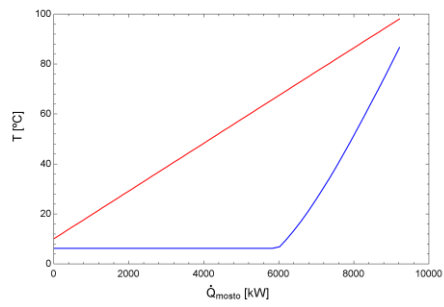
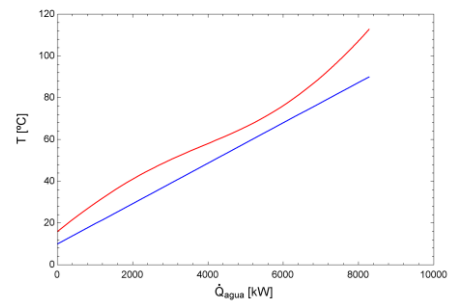


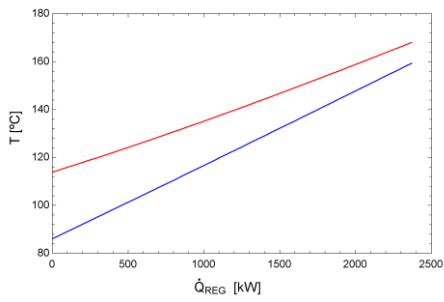
Figura 3.6. Diagrama T-s de la bomba de calor.



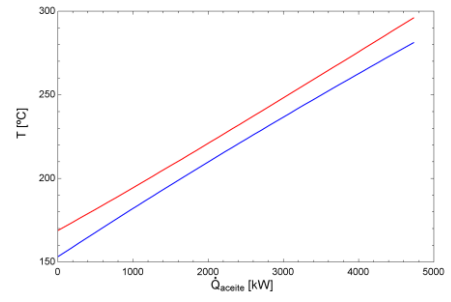
(a) Mosto; $UA = 384 \text{ kW/K}$



(b) Agua; $UA = 843 \text{ kW/K}$



(c) Recuperador; $UA = 153 \text{ kW/K}$



(d) Aceite; $UA = 382 \text{ kW/K}$

Figura 3.7. Diagramas T-Q de los intercambiadores.

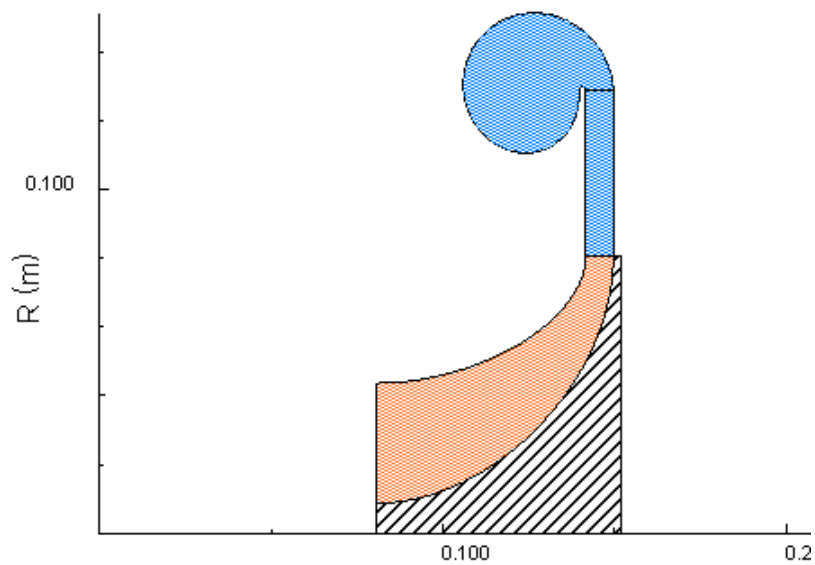


Figura 3.8. Corte meridional del rodete del turbocompresor.

3.3. PRESTACIONES GENERALES

La sección anterior recoge las prestaciones de la bomba en su punto nominal, tomado como 10 °C de la temperatura del agua de red. En esta sección, por el contrario, se muestra el comportamiento de la bomba ante variaciones de dicha temperatura, que condicionan el comportamiento de todos los sistemas.

El turbocompresor se ve afectado especialmente por la variación de temperatura del agua de red, pues ésta afecta a la relación de presiones del ciclo, tal como se muestra en la Figura 3.9. Con objeto de no perder rendimiento cuando la temperatura del agua de red no sea la nominal se ha obtenido el mapa de funcionamiento del compresor, de modo que se propone modificar la velocidad de giro del mismo para optimizar el rendimiento en cada punto de trabajo. La Figura 3.10 recoge la implementación de este control, así como la evolución esperada del rendimiento del compresor.

Teniendo en cuenta el control del compresor, así como la variación de la conductancia de los intercambiadores con la temperatura del agua de red se obtienen las potencias térmicas intercambiadas (Figura 3.11) y la variación del COP (Figura 3.12) según la temperatura del agua de red.

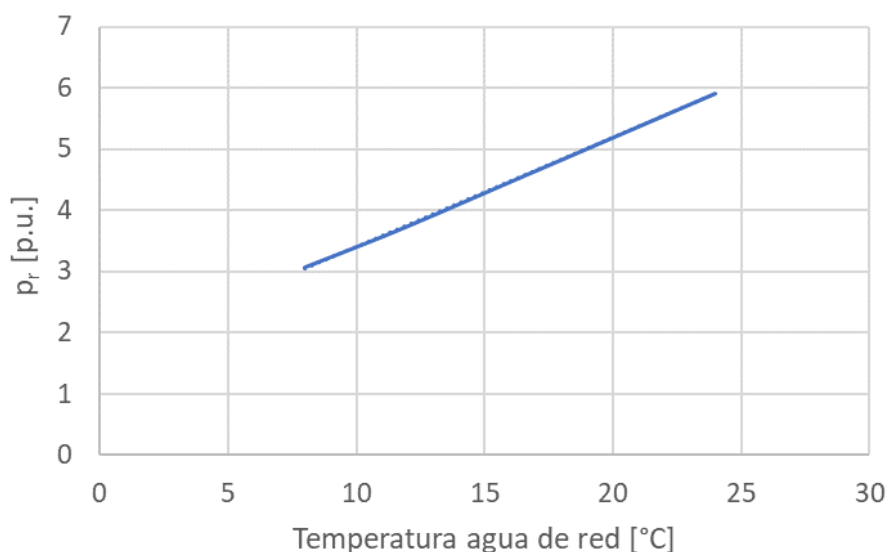


Figura 3.9. Variación de la relación de presiones con la temperatura del agua de red.

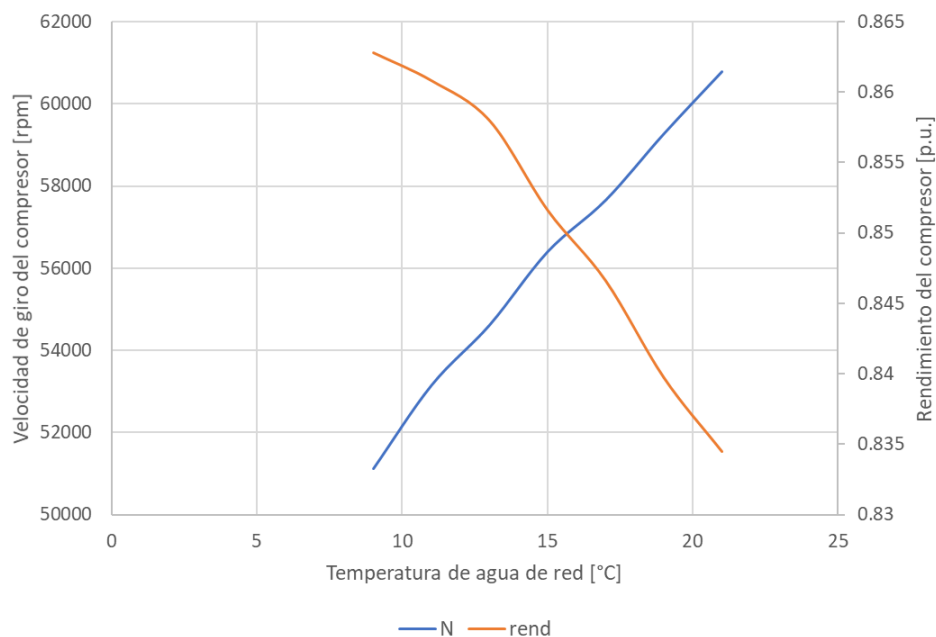


Figura 3.10. Control del régimen del compresor para optimizar el rendimiento ante la variación de la temperatura del agua de red.

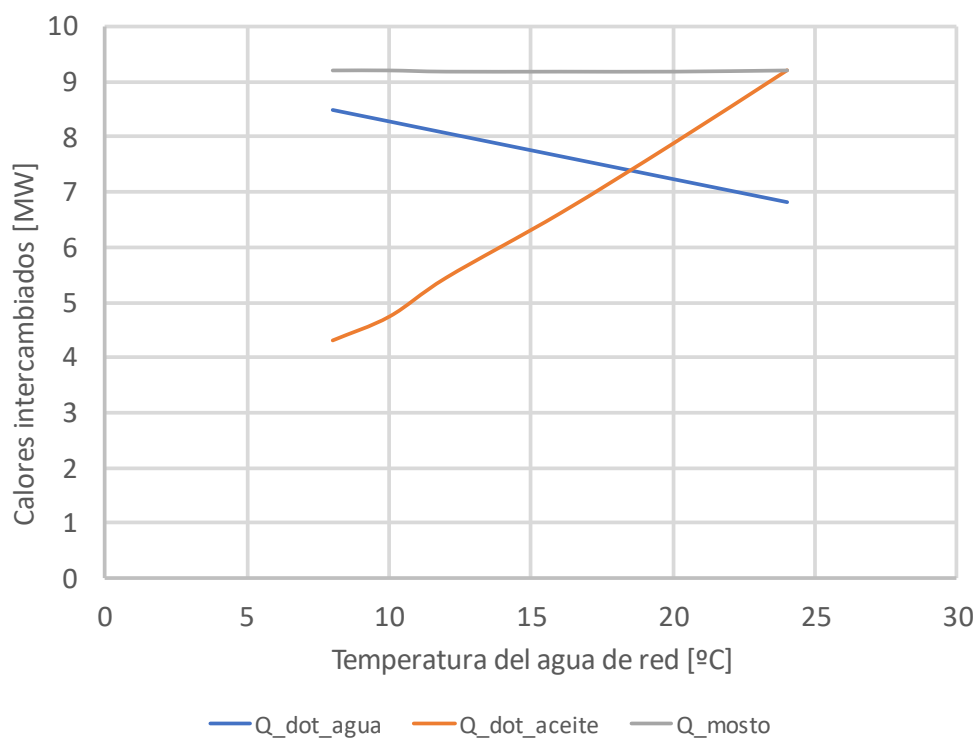


Figura 3.11. Potencias térmicas en los intercambiadores según la temperatura del agua de red.

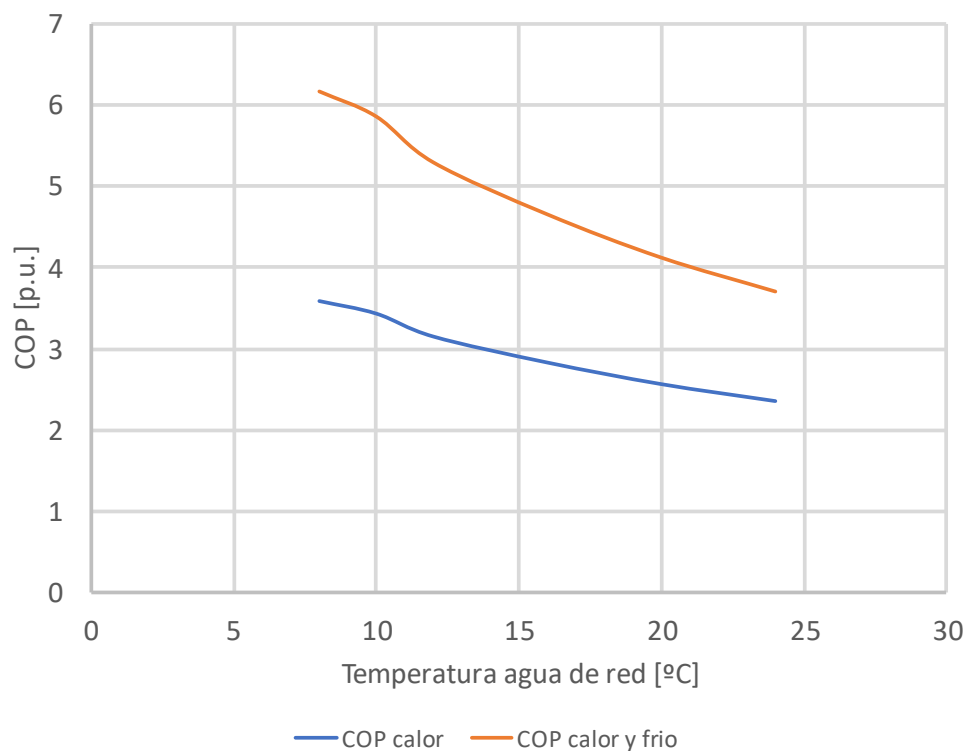


Figura 3.12. COP según la temperatura del agua de red.

3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se han tomado las siguientes hipótesis para el análisis económico, a nivel de costes:

- Coste del gas: 40 €/MWh-PCS
- Tasa del CO₂, reflejada en el coste del gas: 14.4 €/MWh-PCS
- Coste de la electricidad, con garantía de origen renovable: 75 €/MWh
- Tasa de descuento (wacc): 7.5%
- Mantenimiento anual: 5% de la inversión

En cuanto a producción:

- Calor al aceite (producción de vapor): 40.6 GWh/año
- Calor al agua de proceso: 50.7 GWh/año
- Calor retirado del mosto: 59.9 GWh/año
- Consumo eléctrico del compresor: 31.4 GWh/año

Por tanto, los rendimientos estacionales (SCOP) se convierten en 2.91 si sólo se contabiliza el calor y 4.82 si se incluye el frío del mosto como efecto útil.

Con estas hipótesis se obtiene la Tabla 3.1, que compara los flujos económicos (no CAPEX) de la situación de partida con la aplicación de la bomba de calor. Se observa un ahorro anual de más de 607 k€. La Tabla 3.2 recoge el desglose de la inversión, mientras que la Figura 3.13 da el desglose del coste normalizado de la energía térmica suministrada (LCOH), resultando ser de 78.15 €/MWh. Es de destacar que OPEX en la situación de partida asciende a 81.75 €/MWh.

Si bien el LCOH es inferior al coste operativo actual, la inversión (5.85 M€) resulta muy elevada para el ahorro generado. Esto se pone de manifiesto en la Figura 3.14, que muestra el período de retorno en función del nivel de subvención. Se aprecia que, si no se aplica subvención alguna, el retorno resulta superior a 14 años, mientras que para que éste baje hasta 4 años es preciso una subvención del 60% de la inversión.

Tabla 3.1. Comparación económica entre la situación actual con la bomba de calor propuesta.

MES	T agua red [°C]	ACTUALIDAD					BOMBA DE CALOR			
		Consumo gas [MWh-PCS]	Coste gas [€]	Consumo electricidad [MWh-e]	Coste electricidad [€]	OPEX total [€]	Consumo electricidad [MWh-e]	Coste electricidad [€]	Mantenimiento [€]	Ahorro [€]
Enero	10	3,214	174,891	400	30,037	204,929	2,100	157,465	24,368	23,095
Febrero	9	3,008	163,657	344	25,832	189,488	1,988	149,115	24,368	16,006
Marzo	10	3,214	174,891	400	30,037	204,929	2,100	157,465	24,368	23,095
Abril	12.5	3,730	202,978	541	40,551	243,529	2,378	178,342	24,368	40,819
Mayo	15	4,246	231,064	681	51,064	282,129	2,656	199,218	24,368	58,543
Junio	17	4,659	253,534	793	59,475	313,009	2,879	215,919	24,368	72,722
Julio	20	5,279	287,238	961	72,091	359,329	3,213	240,971	24,368	93,990
Agosto	21	5,485	298,472	1017	76,297	374,769	3,324	249,322	24,368	101,079
Septiembre	20	5,279	287,238	961	72,091	359,329	3,213	240,971	24,368	93,990
Octubre	16.5	4,556	247,916	765	57,372	305,289	2,823	211,744	24,368	69,177
Noviembre	13	3,833	208,595	569	42,653	251,249	2,434	182,517	24,368	44,364
Diciembre	11.5	3,524	191,743	485	36,345	228,089	2,267	169,991	24,368	33,729
AÑO		50,028	2,722,218	7,918	593,847	3,316,065	31,374	2,353,041	292,416	670,608

Tabla 3.2. Desglose de la inversión requerida por la bomba de calor.

INVERSIÓN [€]	5,848,314
Intercambiador Agua [€]	11,218
intercambiador Mosto [€]	6,196
Intercambiador Aceite [€]	6,174
Intercambaidor Regenerador [€]	3,102
Compresor [€]	3,572,272
instrumentos [€]	2,249,352
MANTENIMIENTO [€/año]	292,416

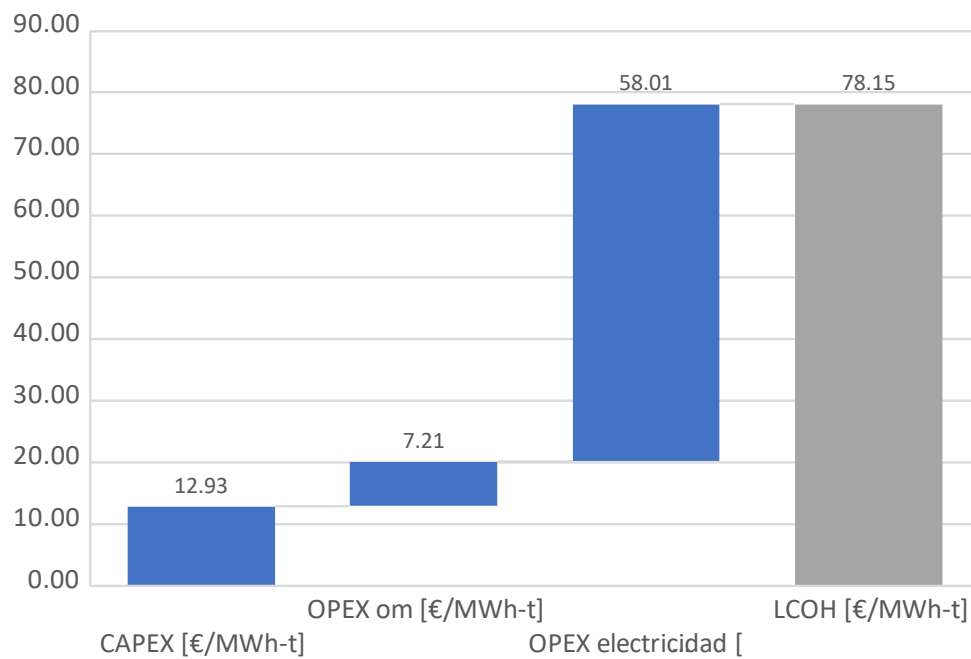


Figura 3.13. Desglose del coste normalizado de suministro térmico (LCOH) con la bomba de calor.

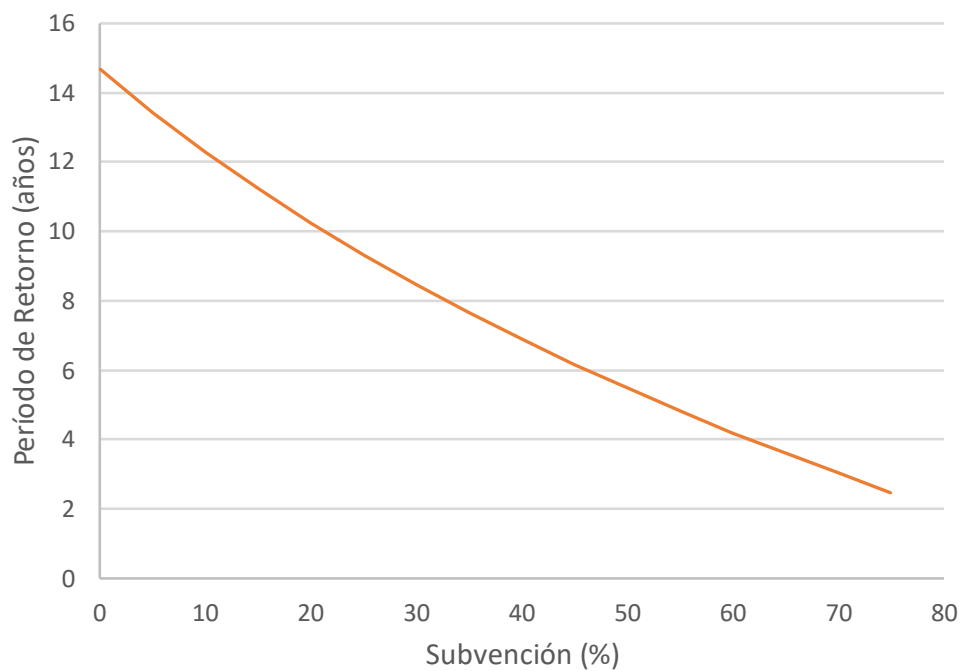


Figura 3.14. Retorno de la bomba de calor según la subvención obtenida para la inversión.

Como se puede ver en la Figura 3.13, la inversión no tiene un peso excesivo en el LCOH, representando 450 €/kWt respecto al calor útil (agua y aceite), en línea con fabricantes de este tipo de máquinas.

De cara a reducir el período de retorno, se han analizado dos escenarios optimistas, con las siguientes hipótesis comunes:

- Tasa de descuento (wacc): 5%
- Doble de capacidad de la bomba de calor
- Factor de mantenimiento: 3%

En el primer escenario, se asume una actualización de la tasa de CO₂ del 3.5% anual, dejándose en cero en el segundo. El LCOH aparece recogido en la figura 2.15, siendo común a ambos escenarios.

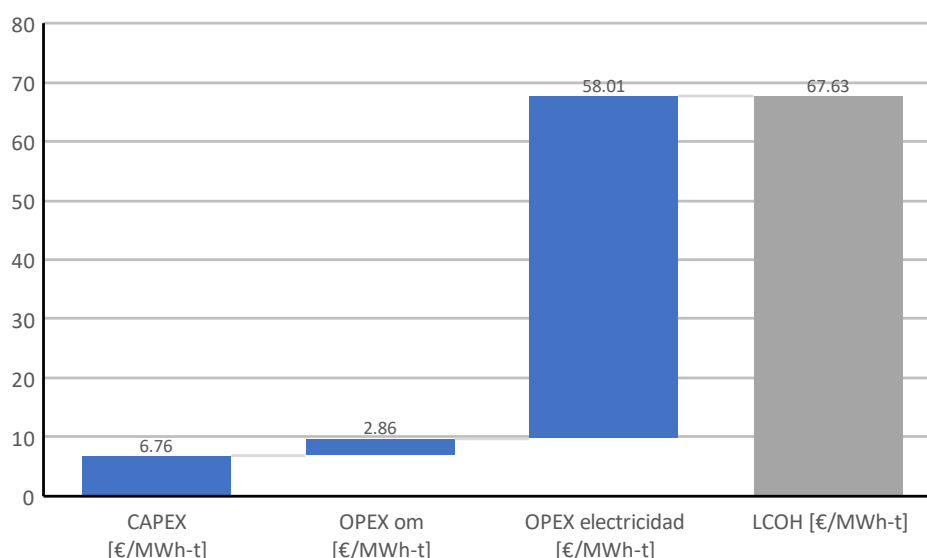


Figura 3.15. Desglose del LCOH según los escenarios optimistas.

En el primer escenario optimista el retorno cae hasta 4.82 años, registrando una inversión específica de 297 €/kW térmicos. En el segundo escenario optimista el retorno asciende a 5.3 años, con la misma inversión específica. Se concluye, por tanto, que la actualización del CO₂ no es tan relevante, mientras que lo que más importa es la escala del proyecto.

Como comparación con la tecnología existente, cabe destacar que el rango de inversión obtenido va de 297 €/kWt (para 26 MWt) a 450 €/kWt (para 13 MWt), que encaja perfectamente en el rango de 300 a 500 €/kWt que el [Annex 58 de la IEA](#) asigna a las bombas de calor MAN con esta tecnología.

4. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

4.1. POTENCIAL DEL SECTOR

El presente informe analiza el potencial técnico y energético de producción de biogás en estaciones depuradoras de aguas residuales industriales (EDARI) diseñadas en exclusiva para hacer frente a los efluentes de las industrias cerveceras. A partir del análisis de parámetros de carga orgánica, volumen de vertidos y consumo energético del sector, se evalúa la viabilidad del aprovechamiento de los efluentes orgánicos generados en el proceso cervecero para la generación de biogás mediante digestión anaerobia y la posible captura de CO₂.

El sector cervecero español tuvo una facturación en el año 2024 de 1.933,5 millones de euros, lo que supuso un aumento del 0.8% con respecto al 2023. Supone el 1,3% del PIB, generando el 2,7% del empleo, lo que equivale a más de 540.000 puestos de trabajo directos e indirectos en todo el país, y representa el 2,6% de la recaudación fiscal. Con una producción de más de 41,29 millones de hectolitros en 2024 y un consumo energético de 1.200 GWh/año, la industria cervecera representa un sector clave para la transición energética en España. Sus aguas residuales, caracterizadas por altas concentraciones de DQO (2.000–6.000 mg/L) y DBO₅ (hasta 3.000 mg/L), ofrecen condiciones favorables para la valorización energética a través de tecnologías de digestión anaerobia. La Figura 4.1 muestra el reparto de los centros de producción por España y la Figura 4.2 la producción de cerveza en España (2020–2024), apreciándose un crecimiento sostenido hasta alcanzar 41,29 millones de hectolitros en 2024.



Figura 4.1. Centros de producción por provincia. Fuente: Cerveceros de España

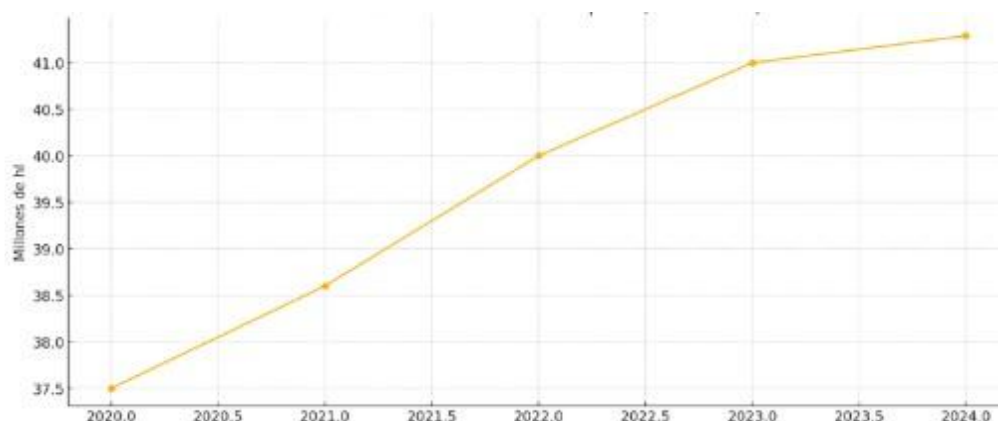


Figura 4.2. Producción de Cerveza En España. Fuente: Cerveceros de España

Los rendimientos técnicos estimados indican una generación de 0,25–0,45 Nm³ de biogás por m³ de agua residual tratada, con un contenido de metano (CH₄) del 55–65 %, lo que permite un aprovechamiento energético directo en forma de calor, electricidad o biometano para inyección a red (éste último tras un enriquecimiento que elimine el CO₂). La implantación de digestores en plantas cerveceras permite no solo una reducción en costes de gestión de residuos (estimados en 20 M€/año), sino también avanzar hacia modelos de economía circular y neutralidad climática. La figura 4.3 muestra las estimaciones para la producción potencial de biogás: entre 20,6 y 74,3 millones de Nm³/año, en función de la carga orgánica y eficiencia del proceso.

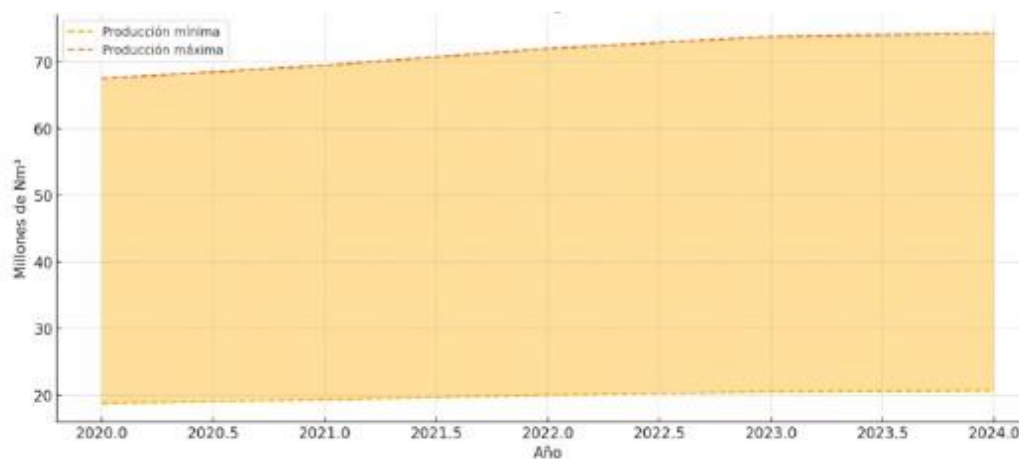


Figura 4. 3. Producción potencial de Biogás en EDARi. Fuente Cerveceros de España

La transformación del modelo energético español hacia un sistema más sostenible, resiliente y descentralizado requiere integrar la valorización energética de los residuos en los sectores industriales estratégicos. La industria cervecera, por su relevancia económica, el elevado volumen de agua procesada y las características especiales de sus vertidos, presenta un destacado potencial para implementar soluciones de generación distribuida renovable mediante digestión anaerobia.

La Figura 4.4 muestra el volumen estimado de aguas residuales se estima entre 2 y 4 m³ por hectolitro de cerveza, resultando en un rango entre 82,58 y 165,16 millones de m³ anuales.



Figura 4.4. Volumen estimado de aguas residuales generadas. Fuente Cerveceros de España

En esta sección se pretende:

- Cuantificar el potencial de producción de biogás a partir de las aguas residuales de las industrias cerveceras.
- Evaluar la calidad del biogás generado y su posible valorización energética.
- Estimar la reducción de costes en gestión de residuos y sus emisiones asociadas.
- Analizar los casos reales de aplicación en el sector cervecero español.
- Proponer líneas estratégicas para la implementación a escala industrial en el horizonte 2025–2030.

Para poder efectuar un análisis técnico detallado del proceso cervecero y de la correcta caracterización de efluentes se parte de la descripción del proceso productivo y de la generación de vertidos. El proceso de elaboración de cerveza se compone de varias etapas unitarias clave que, además de consumir energía y agua, generan flujos de residuos líquidos con características variables, mostrados en la Figura 4.5:

- Malteado: germinación controlada de la cebada. Aunque no suele realizarse in situ en todas las cerveceras, genera aguas con restos de almidones, proteínas y azúcares.
- Maceración y filtración del mosto: alto consumo de agua, produce efluentes con elevada carga de sólidos suspendidos y disueltos (azúcares, compuestos fenólicos).
- Cocción y *whirlpool*: generan efluentes térmicamente cargados y con residuos proteicos.
- Fermentación y maduración: si bien la fermentación en sí no genera muchas aguas residuales, la limpieza de tanques y líneas produce vertidos con levaduras, azúcares residuales y productos de limpieza.
- Filtración, carbonatación y envasado: se generan vertidos con alta intermitencia, que contienen restos de cerveza, CO₂ disuelto y productos químicos de limpieza CIP (Cleaning In Place).

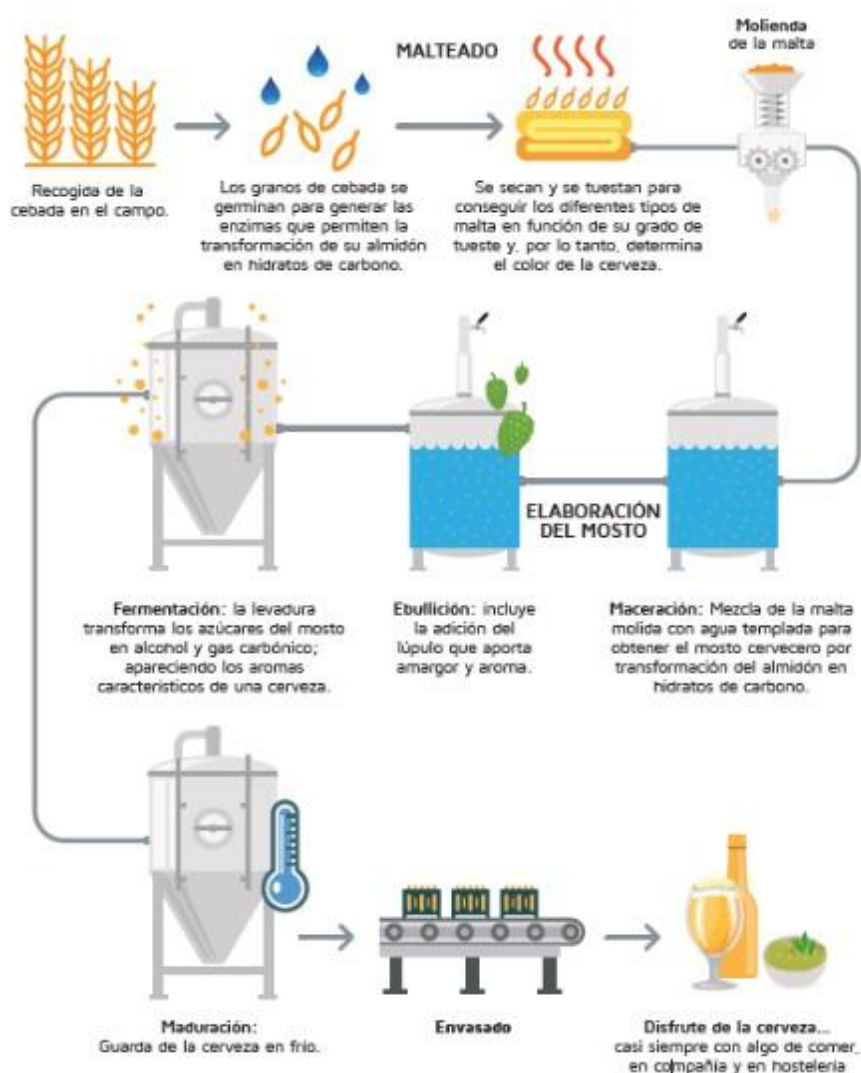


Figura 4.5. Esquema simplificado de la fabricación de la cerveza. Fuente: Cerveceros de España

La generación y las características de las aguas residuales cerveceras vienen marcadas porque el uso de agua en la industria cervecera oscila entre 4 y 7 litros de agua por cada litro de cerveza producido, dependiendo del nivel de automatización y recuperación interna. A efectos prácticos, se estima una generación de 2 a 4 m³ de aguas residuales por hectolitro de cerveza. Estas aguas presentan una elevada carga orgánica y nutrientes, que se resumen en los intervalos dados en la Tabla 4.1. La elevada biodegradabilidad ($DQO/DBO_5 > 0,5$) convierte estos efluentes en candidatos ideales para su tratamiento mediante digestión anaerobia, maximizando la conversión de carbono orgánico a biogás.

Para estudiar la posible estacionalidad o intermitencia y la carga hidráulica, debe tenerse en cuenta que, a diferencia de otras industrias agroalimentarias, la producción cervecera tiene una marcada estacionalidad (especialmente en picos estivales) y una alta variabilidad diaria asociada a los procesos de limpieza. Esto exige dimensionar adecuadamente los

digestores para amortiguar variaciones en carga hidráulica y orgánica, o bien implementar tanques de homogeneización previos.

Tabla 4.1. Parámetros característicos de las aguas residuales de la industria cervecera.

Parámetro	Rango típico
DQO (mg/L)	2.000 – 6.000
DBO ₅ (mg/L)	1.500 – 3.000
Sólidos suspendidos (mg/L)	500 – 1.200
Nitrógeno total (mg/L)	30 – 100
Fósforo total (mg/L)	10 – 30
pH	5,5 – 8,0
Temperatura media (°C)	25 – 35

La implementación de pretratamientos como tamizado fino, homogeneización, y control de pH y temperatura puede mejorar la estabilidad operativa de los digestores anaerobios.

Con una producción cervecera nacional de 41,29 millones de hectolitros (MhL) en 2024, y considerando un rango medio de generación de aguas residuales de 2 a 4 m³ por hectolitro (m³/hL), se estima el siguiente volumen anual de efluentes:

Mínimo: $41,29 \text{ MhL} \times 2 \text{ m}^3/\text{hL} = 82,58 \text{ millones de m}^3/\text{año}$

Máximo: $41,29 \text{ MhL} \times 4 \text{ m}^3/\text{hL} = 165,16 \text{ millones de m}^3/\text{año}$

En función de la carga orgánica y condiciones operativas, el rendimiento de biogás se sitúa entre 0,25 y 0,45 Nm³ por cada m³ de efluente tratado. Aplicando estos rangos:

Producción mínima de biogás:

$82,58 \text{ millones m}^3 \times 0,25 \text{ Nm}^3/\text{m}^3 = 20,645 \text{ millones Nm}^3/\text{año}$

Producción máxima de biogás:

$165,16 \text{ millones m}^3 \times 0,45 \text{ Nm}^3/\text{m}^3 = 74,322 \text{ millones Nm}^3/\text{año}$

La composición típica del biogás generado a partir de aguas residuales cerveceras es:

Metano (CH₄): 55–65 %

Dióxido de carbono (CO₂): 30–40 %

Otros (trazas de H₂S, humedad, N₂): ≤ 5 %

Estimando un valor medio de 60 % CH₄ y 35 % CO₂, los volúmenes de cada componente serían los dados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Producciones de Biogás estimadas

Escenario	Biogás total (Nm ³ /año)	CH ₄ (Nm ³ /año)	CO ₂ (Nm ³ /año)
Mínimo	20,645 millones	12,387 millones	7,226 millones
Máximo	74,322 millones	44,593 millones	26,013 millones

En función de la eficiencia del proceso, parte del CO₂ puede ser recuperado como subproducto útil en la industria alimentaria o para procesos de carbonatación controlada.

4.2. APROVECHAMIENTO

El potencial energético del metano generado se calcula considerando un poder calorífico superior del metano de 11,03 kWh/Nm³, por lo que el contenido energético del CH₄ generado oscilaría entre 137 y 492 GWh. Este potencial energético cubriría entre el 10 % y el 37 % del consumo total del sector cervecero en España, estimado en 1.200 GWh/año, si se aprovechara completamente.

El biogás se puede aprovechar in situ en cogeneraciones (producción simultánea de calor y electricidad), empleándose ese calor para fermentación, pasteurización, CIP... Otra posible aplicación sería el denominado enriquecimiento (*upgrading*) a biometano, el cual puede inyectarse a la red de gas natural o emplearse como combustible de uso vehicular en logística cervecera (camiones de reparto). Finalmente, el CO₂ (biogénico) puede emplearse en carbonatación, procesos de inertización...

La producción cervecera en España está concentrada en cinco grandes grupos, que acumulan el 90% del volumen total. La Tabla 4.3 muestra el potencial de producción de biogás a partir de cada uno de estos grupos.

Tabla 4.3. Producción anual por grupo cervecero en España para el año 2024

Grupo Cervecer	Volumen Total Anual (hL)	Producción estimada de aguas residuales (millones m ³) ¹	Potencial de biogás (millones Nm ³) ²
Mahou San Miguel	27,65	55,3 – 110,6	13,8 – 49,8
Heineken España	16,50	33,0 – 66,0	8,3 – 29,7
Damm	10,40	20,8 – 41,6	5,2 – 18,7
Hijos de Rivera (Estrella Galicia)	7,10	14,2 – 28,4	3,5 – 12,7
Compañía Cervecería Canaria	2,50	5,0 – 10,0	1,3 – 4,5

¹ Suponiendo un rango de 2–4 m³ de agua residual por hL.

² Suponiendo un rendimiento de 0,25–0,45 Nm³ biogás/m³ efluente.

Se puede observar que:

- Mahou San Miguel dispone de un potencial de biogás superior a 49 millones Nm³/año, lo que justificaría inversiones en sistemas de enriquecimiento y cogeneración.
- Heineken y Damm también podrían cubrir una parte sustancial de su demanda energética térmica mediante digestores in situ.
- Grupos regionales como Hijos de Rivera y Compañía Cervecería Canaria presentan oportunidades para proyectos descentralizados de biometano y captura de CO₂.

La industria cervecera constituye un ejemplo representativo del potencial de economía circular industrial cuando se integran tecnologías de tratamiento y valorización de residuos, eficiencia energética y aprovechamiento de subproductos. Durante el proceso de

elaboración de cerveza, además de aguas residuales, se generan grandes cantidades de subproductos sólidos, entre los que destacan:

- Bagazo de malta: representa hasta el 85 % de los residuos sólidos, con alto contenido en fibra y proteínas.
- Levadura excedente: rica en compuestos nitrogenados y valor nutricional.
- Lodos biológicos (digestato): residuo final de la digestión anaerobia.

Estos residuos pueden ser aprovechados para:

- Uso agrícola como fertilizante orgánico: el digestato generado en EDARi tras la digestión anaerobia contiene nitrógeno, fósforo y materia orgánica estabilizada, y puede sustituir fertilizantes minerales si se gestiona adecuadamente conforme al RD 506/2013.
- Alimentación animal (en el caso del bagazo seco y estabilizado).
- Sustrato para compostaje en instalaciones próximas.

La valorización de residuos orgánicos mejora el rendimiento ambiental del ciclo de vida de la cerveza, reduce costes de gestión y favorece la circularidad local.

El biogás generado en EDARi puede utilizarse internamente en la propia cervecera:

- Generación de calor mediante calderas de biogás, sustituyendo consumo de gas natural en procesos térmicos (pasteurización, limpieza CIP, precalentamiento).
- Cogeneración de electricidad y calor mediante motores CHP.

Esto permite un autoconsumo energético directo y mejora la seguridad energética, reduciendo la dependencia externa y los costes de operación.

El biogás contiene entre un 30–40 % de dióxido de carbono (CO₂), que habitualmente se elimina en el proceso de enriquecimiento. Sin embargo, su recuperación y reutilización in situ permite usos tales como:

- Carbonatación controlada de la cerveza.
- Inertización de tanques y líneas.
- Reutilización en procesos industriales o agrícolas.

La recuperación de CO₂ permite sustituir el uso de CO₂ comercial, reducir emisiones de alcance 3 y cerrar el ciclo del carbono dentro de la instalación.

4.3. CONCLUSIONES

Como conclusiones a esta breve exploración de la producción de biogás en el sector cervecero se pueden destacar:

- **Potencial energético significativo:** La industria cervecera española genera entre 20 y 74 millones de Nm³/año de biogás aprovechable a partir de sus aguas residuales, lo que supone un potencial energético de hasta 492 GWh/año en forma de biometano.

- **Sector priorizable:** Cinco grupos cerveceros concentran la mayor parte de la producción y, por tanto, del potencial de valorización energética. Destacan Mahou San Miguel y Estrella Galicia.
- **Aprovechamiento del CO₂:** El biogás generado contiene entre 7 y 26 millones de Nm³/año de CO₂, susceptible de ser reutilizado como insumo en procesos de carbonatación o inertización (la captura se produce en el propio enriquecimiento para producir biometano a partir de biogás).
- **Contribución a los objetivos climáticos:** La digestión anaerobia permite reducir los costes de gestión de residuos (estimados en 20 M€/año) y avanzar hacia la neutralidad climática y la eficiencia hídrica-energética.

Pese a estas ventajas, el aprovechamiento del biometano presenta alguna barreras, como son las limitaciones normativas y técnicas en la inyección de biometano, infraestructuras y procesos administrativos, que deben ser resueltas para escalar estas soluciones.

A partir de todo lo anterior se pueden realizar algunas recomendaciones:

- Incentivar la implantación de digestores en plantas industriales medianas y grandes.
- Priorizar modelos de economía circular con recuperación energética y de CO₂.
- Aprovechar programas públicos de financiación para descarbonización industrial.
- Fomentar la estandarización autonómica para agilizar licencias de EDARi y plantas de biogás.

5. REFERENCIAS

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2012). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3228–3242. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.046>
- Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. K. (2003). Applications of the anaerobic digestion process. In *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* (Vol. 82, pp. 1–33). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45838-7_1
- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Cerveceros de España. (2019). Memoria de sostenibilidad ambiental del sector cervecero. Cerveceros de España. https://cerveceros.org/uploads/5c93c65198977_Informe%20de%20Sostenibilidad%20Medioambiental_Cerveceros%20de%20Espana%C3%B1a.pdf
- Cerveceros de España. (2024). Informe socioeconómico del sector cervecero español 2023. <https://loopulo.com/cerveceros-de-espana/informe-socio-economico-cerveza-2023/>
- Cerveceros de España & MAPA. (2025). Informe socioeconómico del sector de la cerveza en España 2024 (003-23-053–3). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). https://cerveceros.org/uploads/Informe_Socioeconomico_2024.pdf
- Cimini, A., & Moresi, M. (2016). Carbon footprint of a pale lager packed in different formats: Assessment and sensitivity analysis based on transparent data. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4196–4213. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.063>
- CNMC. (2024). Informe sobre el estado del biometano en España. <https://www.cnmc.es/>
- Ecoinvent. (2019). Market for irrigation—Spain—Irrigation | ecoQuery. ecoQuery.Ecoinvent. <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.8/apos/dataset/7841/documentation>
- Ecoinvent. (2023, October 28). Ecoinvent Version 3.8. Ecoinvent. <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.8>
- Ecovidrio & Cerveceros de España. (2023). Guía de Ecodiseño para el sector de la Cerveza. Cerveceros de España. <https://cerveceros.org/noticias/ecovidrio-y-cerveceros-de-espana-presentan-una-guia-con-mas-de-70-medidas-de-ecodiseno-para-el-sector>
- Ence Energía y Celulosa. (2024). Memoria de sostenibilidad. <https://www.ence.es>
- European Biogas Association. (2024). Biomethane Market Report 2024. <https://www.europeanbiogas.eu/>
- IDAE. (2023). Estrategia Española de Impulso del Biogás. <https://www.idae.es/>

ISO. (2006a). Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework (14040:2006; Version 2). International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/standard/37456.html> (Published)

ISO. (2006b). Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines (14044:2006; Version 1). International Organization for Standardization (ISO). <https://www.iso.org/standard/38498.html> (Published)

Mahou San Miguel. (2024). Informe de sostenibilidad 2023. <https://www.mahou-sanmiguel.com>

MAPA. (2025). Informe del consumo alimentario en España 2024 (003-19-161–9). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). <https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/alimentacion/temas/consumo-y-tendencias-en-alimentacion/panel-de-consumo-alimentario/ultimos-datos/consumo-2024/informe-consumo-2024-baja.pdf>

Martin, M., Herlaar, S., Jönsson, A., & Lazarevic, D. (2022). From Circular to Linear? Assessing the Life Cycle Environmental and Economic Sustainability of Steel and Plastic Beer Kegs. *Circular Economy and Sustainability*, 2(3), 937–960. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00142-w>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). (2023). Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2023–2030. <https://www.miteco.gob.es>

Mussatto, S. I. (2014). Brewer's spent grain: A valuable feedstock for industrial applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264–1275. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6486>

Nemecek, T., Bengoa, X., Lansche, J., Roesch, A., Faist-Emmenegger, M., Rossi, V., & Humbert, S. (2019). Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. Version 3.5, December 2019. World Food LCA Database (WFLDB). Quantis and Agroscope. https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/11/WFLDB_MethodologicalGuidelines_v3.5.pdf

Niero, M., & Olsen, S. I. (2016). Circular economy: To be or not to be in a closed product loop? A Life Cycle Assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.023>

Ortiz, I., Torreiro, Y., Molina, G., Maroño, M., & Sánchez, J. M. (2019). A Feasible Application of Circular Economy: Spent Grain Energy Recovery in the Beer Industry. *Waste and Biomass Valorization*, 10(12), 3809–3819. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00677-y>

Quesada López, C. (2025, May 20). El sector de la cerveza en España 2023 [Webinar]. Avanzando hacia la descarbonización de la industria cervecera, Madrid, Spain. <https://openroom.fundacionrepsol.com/es/eventos/221228/>

Schindler, D. W. (2006). Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 51(1, part 2), 356–363.
https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0356

Thomsen, I. K., & Christensen, B. T. (2004). Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops. *Soil Use and Management*, 20(4), 432–438. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00393.x>

Tua, C., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2020). Reusing glass bottles in Italy: A life cycle assessment evaluation. *Procedia CIRP*, 90, 192–197.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.094>

Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>