



## Trabajo Fin de Grado

Captura, reducción y utilización de emisiones de CO2 en la industria cervecera.

Capture, reduction and use of CO2 emissions in the brewing industry

Autor/es

Inés Senante Llombart

Director/es

Luis Miguel Romeo Giménez.

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020/2021

## 1. RESUMEN:

Teniendo en cuenta que la cerveza es una de las bebidas más consumidas en el mundo y la actual sensibilidad existente con el medio ambiente es necesario estudiar métodos para reducir las emisiones de contaminantes en el proceso de producción de la cerveza y que dichos métodos usen a su vez energías sostenibles.

Para ello, se ha realizado un estudio de las emisiones de contaminantes en una microcervecería modelo cuya producción ronda los 18000 hl de cerveza. Se observó que las emisiones contaminantes más notorias en la elaboración de la cerveza son las emisiones de CO<sub>2</sub>. Dichas emisiones se encuentran básicamente en dos etapas de su producción, en la cocción del mosto y en la fermentación de la cerveza. Para la microcervecería estudiada dichas emisiones se encuentran en torno a los 13.5 [kg CO<sub>2</sub>/hl cerveza].

Se ha estudiado el aprovechamiento de estas emisiones de CO<sub>2</sub> usando el método Power to Gas. Este método circular consiste en aprovechar las emisiones de CO<sub>2</sub> para producir CH<sub>4</sub> (gas natural sintético), que es el combustible necesario para realizar la cocción del mosto con el que se elabora la cerveza. Para producir el gas natural usando el proceso Power to Gas se necesita H<sub>2</sub> y para ello se pretenden usar electrolizadores, unos equipos que usan corriente eléctrica para disociar la molécula de agua. Con los 13.5 [kg CO<sub>2</sub>/hl cerveza] obtenemos que se necesitan 2.478 [kg H<sub>2</sub>/hl cerveza] para producir 4.41 [kg CH<sub>4</sub>/hl cerveza], que son los kilos de metano necesarios para llevar a cabo la elaboración de 1 hl de cerveza.

Además, para que el proceso sea renovable y sostenible con el medioambiente se plantea el uso de la energía fotovoltaica a través de placas solares. Dichas placas serán las encargadas de producir la energía eléctrica necesaria tanto para la alimentación de los electrolizadores como para el propio proceso de elaboración de la cerveza. El electrolizador PEM usado en la fábrica modelo planteada para producir el H<sub>2</sub> necesario consume aproximadamente 125 [kWh/hl cerveza] y la energía eléctrica necesaria en el proceso son 12 [kWh/hl cerveza]. Para producir los 137 [kWh/hl cerveza] necesarios se requieren 3006 placas solares.

Por último, se estiman unos costes para realizar una comparación con los costes actuales de una fábrica perteneciente a la industria cervecera y de esta forma comprobar la viabilidad de este método en la industria cervecera española. Los costes extras en la implantación de este método con respecto a la misma fábrica sin el uso de energía renovable ascienden a 107 000 [€/año]. Lo que a simple vista parece inviable, pero se debe contemplar el mercado de venta del producto y los futuros avances tecnológicos en la metodología empleada. Es decir, si dicha cerveza se incluye en un mercado sostenible cuyo precio de venta aumenta 1 [€/litro de cerveza], los beneficios extras de la microcervecería ascienden a 1 800 000 [€/año]. Esto adquiere a la microcervecería de una solvencia económica para subsanar los 107 000 [€/año] de costes extras por implantar el método estudiado. Con todo ello, se obtienen unos beneficios de 1 693 000 [€/año]

# ÍNDICE

1. RESUMEN: .....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	6
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO GENERAL DE LA ELABORACIÓN DE CERVEZA: .....	7
1. NIVELES ACTUALES DE CONSUMO Y EMISIÓN EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA CERVEZA .....	10
1) <i>NIVELES DE CONSUMO:</i> .....	11
2) <i>NIVELES DE EMISIÓN</i> .....	14
4. PROCESO POWER TO GAS Y DIMENSIONADO FOTOVOLTAICO ASOCIADO A UNA FÁBRICA MODELO .....	20
1) PROCESO POWER TO GAS .....	20
1. <i>ELECTROLISIS:</i> .....	21
2. <i>METANACIÓN:</i> .....	24
2) DIMENSIONADO POWER TO GAS Y DIMENSIONADO FOTOVOLTAICO ASOCIADO A UNA FÁBRICA MODELO 100% SOSTENIBLE .....	25
1. <i>DIMENSIONADO POWER TO GAS:</i> .....	25
2. <i>DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA:</i> .....	26
3) DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA Y PRODUCCIÓN DE EMISIONES SI ES PARCIALMENTE RENOVABLE. .....	30
CASO 2: <i>PRODUCCIÓN RENOVABLE DEL 75% DE LA ENERGÍA TÉRMICA Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.</i> .....	31
CASO 3: <i>PRODUCCIÓN RENOVABLE DEL 50% DE LA ENERGÍA TÉRMICA Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.</i> .....	31
CASO 4: <i>PRODUCCIÓN RENOVABLE DEL 25% DE LA ENERGÍA TÉRMICA Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.</i> .....	32
CASO 5: <i>PRODUCCIÓN RENOVABLE EL CO<sub>2</sub> DE LA FERMENTACIÓN Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.</i> .....	33
CASO 6: <i>PRODUCCIÓN RENOVABLE SOLO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.</i> .....	33
5. COSTES DEL DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO POWER TO GAS E INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA PARA UNA MICROFERVECERÍA .....	34
1) COSTES POWER TO GAS E INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA: .....	34
1. <i>COSTES INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA:</i> .....	35
2. <i>COSTES ELECTROLIZADORES PEM:</i> .....	35
3. <i>COSTES METANIZADOR:</i> .....	36
4. <i>COSTE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>:</i> .....	37
2) COSTE COMPRANDO LA ENERGÍA NECESARÍA:.....	37
1. <i>COSTE COMPRA ENERGÍA ELÉCTRICA:</i> .....	37
2. <i>COSTE COMPRA GAS NATURAL:</i> .....	38
3. <i>COSTE MERCADO DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub>:</i> .....	39
3) COMPARACIÓN DE LOS COSTES ENTRE TODOS LOS CASOS ESTUDIADOS:.....	39
1. <i>COSTES INICIALES</i> .....	39
2. <i>COSTES FIJOS ANUALES:</i> .....	40
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS: .....	41
7. CONCLUSIÓN:.....	43
8. ANEXO 1:.....	44
1. RECEPCIÓN DE MATERIAS PRIMAS: .....	44
2. MALTERÍA: .....	46
3. COCCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DEL MOSTO:.....	48
4. FERMENTACIÓN:.....	54
5. MADURACIÓN:.....	55
6. FILTRACIÓN: .....	55

7. PREPARACIÓN DE ENVASES .....	56
8. ENVASADO:.....	56
9. BIBLIOGRAFÍA.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	COMPONENTES NECESARIOS SEGÚN EL MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA [2] .....	10
TABLA 2.	RANGO DE EMISIONES SEGÚN EL MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA [2].....	10
TABLA 3.	PORCENTAJES DE ENERGÍA TÉRMICA EN CADA PROCESO (DATOS OBTENIDOS DE: [4]).....	12
TABLA 4.	PORCENTAJES DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CADA PROCESO (DATOS OBTENIDOS DE: [4]) .....	12
TABLA 5.	ENERGÍA TÉRMICA EN CADA PROCESO (ELABORACIÓN PROPIA).....	13
TABLA 6.	ENERGÍA ELÉCTRICA EN CADA PROCESO (ELABORACIÓN PROPIA) .....	14
TABLA 7.	PARÁMETROS CONTAMINANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES EN KG/HL DE CERVEZA (DATOS OBTENIDOS DE [2])	14
TABLA 8.	VALORES CARACTERÍSTICOS DE UN ELECTROLIZADOR PEM [12] .....	23
TABLA 9.	CARACTERÍSTICAS PLACA SOLAR [14] .....	26
TABLA 10.	IRRADIACIÓN GLOBAL PARA UN ÁNGULO ÓPTIMO EN ZARAGOZA (DATOS OBTENIDOS DE [16]) .....	27
TABLA 11.	DATOS OBTENIDOS DEL IDAE [19] .....	28
TABLA 12.	CÁLCULOS HSP .....	28
TABLA 13.	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MENSUALMENTE [KWH/MES].....	29
TABLA 14.	PRODUCCIÓN DE H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> Y CH <sub>4</sub> [KG].....	29
TABLA 15.	DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CASO 2 .....	31
TABLA 16.	DIMENSIONADO INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CASO 3 .....	31
TABLA 17.	DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CASO 4 .....	32
TABLA 18.	DIMENSIONADO INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CASO 5 .....	33
TABLA 19.	DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA.....	33
TABLA 20.	COSTES PLACAS SOLARES. DATOS OBTENIDOS DE [20] .....	35
TABLA 21.	COSTES INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA. .....	35
TABLA 22.	COSTES ELECTROLIZADOR.....	36
TABLA 23.	COSTES METANIZADOR.....	36
TABLA 24.	COSTES CAPTURA CO <sub>2</sub> DESGLOSADOS. DATOS OBTENIDOS DE [24] .....	37
TABLA 25.	COSTES CAPTURA CO <sub>2</sub> .....	37
TABLA 26.	COSTE COMPRANDO ENERGÍA ELÉCTRICA CASO 7 .....	38
TABLA 27.	COSTE COMPRANDO GAS NATURAL.....	38
TABLA 28.	COSTES MERCADO DE EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	39
TABLA 29.	COSTES AMORTIZACIÓN PARA CADA CASO .....	40
TABLA 30.	COSTES FIJOS PARA CADA CASO .....	40
TABLA 31.	DIFERENCIA ENTRE LAS DIVERSAS CASUÍSTICAS EN COMPARACIÓN CON EL CASO 7.....	41
TABLA 32.	COMPOSICIÓN DEL LÚPULO (DATOS OBTENIDOS DE: [30]) .....	45
TABLA 33.	PARTÍCULAS OBTENIDAS EN LA MOLIENDA (DATOS OBTENIDOS DE: [30]).....	49

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1.	<i>PROCESO GENERAL DE LA ELABORACIÓN DE LA CERVEZA (ELABORACIÓN PROPIA)</i> .....	7
GRÁFICO 2.	ESQUEMA PROCESO PRODUCTIVO CERVEZA [ELABORACIÓN PROPIA] .....	9
GRÁFICO 3.	<i>PROCESO POWER TO GAS [8]</i> .....	21
GRÁFICO 4.	COMPARACIÓN PRODUCCIÓN CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> Y H <sub>2</sub> CON LO NECESARIO .....	30
GRÁFICO 5.	COMPARACIÓN PRODUCCIÓN CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> Y CO <sub>2</sub> CON LO QUE SE NECESITA PARA EL CASO 2 .....	31
GRÁFICO 6.	COMPARACIÓN PRODUCCIÓN CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> Y CO <sub>2</sub> CON LO QUE SE NECESITA PARA EL CASO 3 .....	32
GRÁFICO 7.	COMPARACIÓN PRODUCCIÓN CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> Y CO <sub>2</sub> CON EL NECESARIO PARA EL CASO 4 .....	32
GRÁFICO 8.	COMPARACIÓN PRODUCCIÓN CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> Y CO <sub>2</sub> CON EL NECESARIO PARA EL CASO 5 .....	33
GRÁFICO 9.	ENCUESTA A LOS CONSUMIDORES (ELABORACIÓN PROPIA) .....	42
GRÁFICO 10.	<i>GRÁFICA TEMPERATURA – TIEMPO COCCIÓN ATMOSFÉRICA (DATOS OBTENIDOS DE: [4])</i> .....	51
GRÁFICO 11.	<i>GRÁFICA TEMPERATURA – TIEMPO COCCIÓN A BAJA PRESIÓN (DATOS OBTENIDO DE [4])</i> .....	52

## 2. INTRODUCCIÓN

La cerveza es una de las bebidas más consumida en todo el mundo debido a su carácter refrescante y social y a su precio económico. Más concretamente, en el año 2019 en España se consumieron más de 41 millones de hectolitros. Esto sitúa a las empresas cerveceras en la cima del sector agroalimentario español.

Cabe destacar que en España el sector cervecero ha prestado siempre especial atención en la sostenibilidad ambiental en toda la cadena de producción, desde el cultivo de la materia prima gracias a los agricultores, pasando por los productores, distribuidores y hosteleros hasta llegar al consumidor final.

En 2019, el sector cervecero español asumió una serie de compromisos medioambientales con horizonte 2025. Se comprometieron a realizar envases con un 80% de material reciclado, consumir un 100% de electricidad de energía renovable, incrementar en un 10% la aportación de energía térmica procedentes de fuentes renovables, reducir en un 15% el ratio de emisiones de gases de efecto invernadero,...

Así pues, los cerveceros españoles se han ido sumando a las diferentes iniciativas internacionales con el fin de lograr objetivos climáticos y de energía, como la Estrategia europea del clima, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero con el Acuerdo de París, y la transición a una economía circular gracias a la implantación de medidas para cumplir los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Si a la concienciación de los productores de cerveza, le sumamos la concienciación de la población y las nuevas legislaciones que cada vez son más restrictivas en cuanto al tema de emisiones contaminantes al medioambiente, es importante estudiar un método que reduzca dichas emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria cervecera gracias al uso de energías sostenibles.

Por todo ello, el objetivo del presente documento es exponer un método para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria cervecera aplicándolo a una fábrica específica. El estudio abarca tanto la reducción de producción de CO<sub>2</sub> en la elaboración de la cerveza usando el método Power to Gas, como a reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la generación de la energía eléctrica y térmica necesaria en el proceso a través del uso de la energía fotovoltaica con el empleo de placas solares. Además, se quiere estudiar la viabilidad económica de este proceso en el mercado actual español.

Para abordar el problema se ha supuesto una fábrica de cerveza estándar con sus respectivos consumos de energía usando una bibliografía revisada y estableciendo las hipótesis pertinentes en datos no coincidentes o inexistentes. Para implantar el método Power to Gas se han realizado los balances de masa y energía tanto para obtener la producción de CO<sub>2</sub> en el proceso global de elaboración de la cerveza, como para obtener la producción de H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> necesario en el proceso Power to Gas. Para realizar estos cálculos de forma más simple y sistemática se ha usado el programa Excel.

Para que el proceso Power to Gas sea sostenible y responsable con el medio ambiente necesita obtener la energía eléctrica necesaria a través de un método que también lo sea, para la obtención de dicha energía eléctrica se ha decidido usar placas solares. Para el estudio de la instalación fotovoltaica se ha empleado el programa Excel para los cálculos necesarios así como la base de datos PVGIS para obtener los datos de la radiación solar en la ubicación elegida para dicha instalación.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO GENERAL DE LA ELABORACIÓN DE CERVEZA:

La elaboración de la cerveza tiene una serie de etapas con control de temperatura y de tiempo en cada una de ellas. De manera general, el proceso de elaboración de la cerveza se recoge en el Gráfico 1.

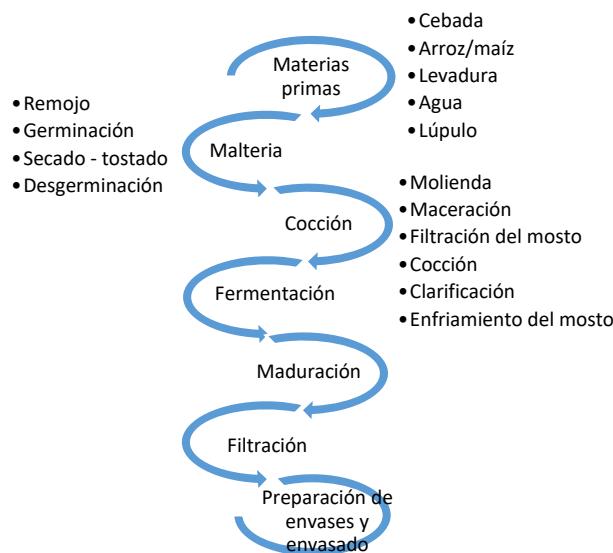


Gráfico 1. Proceso general de la elaboración de la cerveza (Elaboración propia)

Vamos a analizar de manera breve el proceso detallado en el gráfico anterior. El proceso explicado en detalle se encuentra en el Anexo 1.

La primera etapa es la **recepción de materias primas**. Para fabricar la cerveza necesitamos 5 materias primas:

- Malta: Obtenida a partir de la cebada.
- Agua: Su composición influye notablemente en la calidad de la cerveza producida por ello es necesario estandarizarla.
- Levadura: Es la encargada de llevar a cabo la fermentación.
- Lúpulo: Proporciona aroma y amargor a la cerveza, además de su contribución a una buena conservación.
- Adjuntos: Aumentan el porcentaje de azúcares de la cerveza.

Los granos de cebada se limpian a través de una molienda para su posterior almacenamiento. Transcurrido un tiempo se envían dichos granos a la **maltería**. En esta etapa los granos de cebada se convierten en malta por medio de la germinación controlada. Este proceso dura aproximadamente 8 días y se desarrolla en cuatro etapas principalmente: remojo, germinación, secado – tostado y desgerminación.

En el *remojo*, los granos de cebada con humedad inicial del 12 – 13% son sumergidos en agua con una determinada temperatura y oxigenación para alcanzar una humedad final del 43 – 44% [1].

Los granos humedecidos en el proceso anterior se almacenan en germinadores donde se produce la *germinación*, un desarrollo de enzimas favorecido por corrientes de aire. Debido a que es un proceso respiratorio se produce CO<sub>2</sub> y calor. Al final de este proceso se obtiene lo que se denomina malta verde.

Para favorecer la conservación de la malta debemos retirar el agua absorbida por el grano, esto se realiza en el proceso de *secado - tostado*. Para reducir la humedad del grano usamos un flujo constante de aire seco.

Por último se eliminan las raíces formadas en la germinación a través de frotación en el proceso de *desgerminación*.

Al finalizar estas cuatro etapas se obtiene malta procesada. Esta malta se utiliza en la **cocción** para obtener un mosto cocinado siguiendo 6 etapas: molienda, maceración, filtración del mosto, cocción, clarificación y enfriamiento del mosto.

En primer lugar, la malta procesada y los adjuntos son enviados a la *molienda* para ser triturados y reducir su tamaño para permitir una maceración adecuada. Para realizar este proceso se usan molinos de rodillo o de martillo. Con este proceso se obtiene una harina o sémola que se introduce en un tamiz con distintos tamaños para separar las partículas de forma útil y de esta forma se obtiene una extracción de los azúcares posterior más eficiente.

A continuación se realiza la *maceración*, el proceso donde se convierten los almidones de los granos en azúcar dando lugar a un líquido azucarado mediante la acción del agua, el calor y las enzimas. En esta fase también se pueden añadir adjuntos previamente acondicionados, a fin de aumentar el porcentaje de almidón.

Después tenemos que separar los sólidos o bagazo presente en el líquido azucarado que se ha obtenido en el proceso anterior a través de una cuba filtro o un filtro prensa y se obtiene lo que se denomina mosto, esto se realiza en el proceso de *filtración del mosto*.

Al mosto filtrado agregamos el lúpulo e introducimos la mezcla en la *caldera de ebullición* para obtener un mosto cocinado. Dependiendo de la temperatura a la que se realice el proceso tenemos distintos tipos de cocción: cocción atmosférica, cocción a baja presión y cocción mixta. Pero independientemente del tipo utilizado, este es el proceso que más energía consume en la elaboración de la cerveza.

El mosto cocinado se deja reposar en un tanque de sedimentación Whirpool y de esta forma las partículas indeseadas se aglutan en el fondo y se extraen, y así se obtiene un *mosto clarificado*. A continuación se *enfria* este mosto gracias a un intercambiador de calor para que alcance la temperatura óptima para una adecuada fermentación.

La siguiente etapa es la **fermentación**, consiste en añadir al mosto cocinado la levadura para realizar la multiplicación celular y transformar los azúcares del mosto en alcohol y gas carbono agotando el oxígeno de la mezcla. El gas carbónico y la levadura formada en exceso en este proceso pueden ser extraídos y reutilizados en otros procesos. De este proceso se obtiene una cerveza no madura.

Esta cerveza producida es transferida a los **tanques de maduración** para reposo con la finalidad de decantar las levaduras aun presentes en la cerveza, a esto se le conoce como fermentación secundaria.

Posteriormente se debe retirar las levaduras presentes en la cerveza a través de la **filtración**. Para ello se realizan cuatro subetapas, no todas son necesarias pero si muy recomendables.

- Centrifugación: Para eliminar la levadura restante y los precipitados.

- Filtración: A través de tierra diatomácea o filtrado de membrana. Una vez filtrada se envía a tanques para ser analizada por los sistemas de control de calidad donde se comprueba su contenido de CO<sub>2</sub>, su concentración y su estabilidad.
- Abrillantado: Mediante placas filtrantes
- Pasteurizador flash: Se realiza para conservar la cerveza hasta su consumo. Este proceso se realiza antes o después de ser envasada dependiendo del tipo de envase empleado.

Una vez la cerveza cumple con todos los parámetros establecidos, es enviada a las líneas de escape de envase para que el producto sea embotellado, enlatado, embarrillado o colocado en auto – tanques.

El **envasado** puede ser en botellas, retornables o de un solo uso, en latas o en barriles. Las líneas de envasado son distintas según el tipo de envase. Una vez están envasadas, las botellas con la cerveza pasan por un filtro de calidad antes de ser etiquetadas.

En el Gráfico 2 se expone un esquema del proceso explicado anteriormente detallando tiempos y temperaturas de cada una de las etapas para ilustrar de forma más visual el proceso de elaboración de la cerveza.

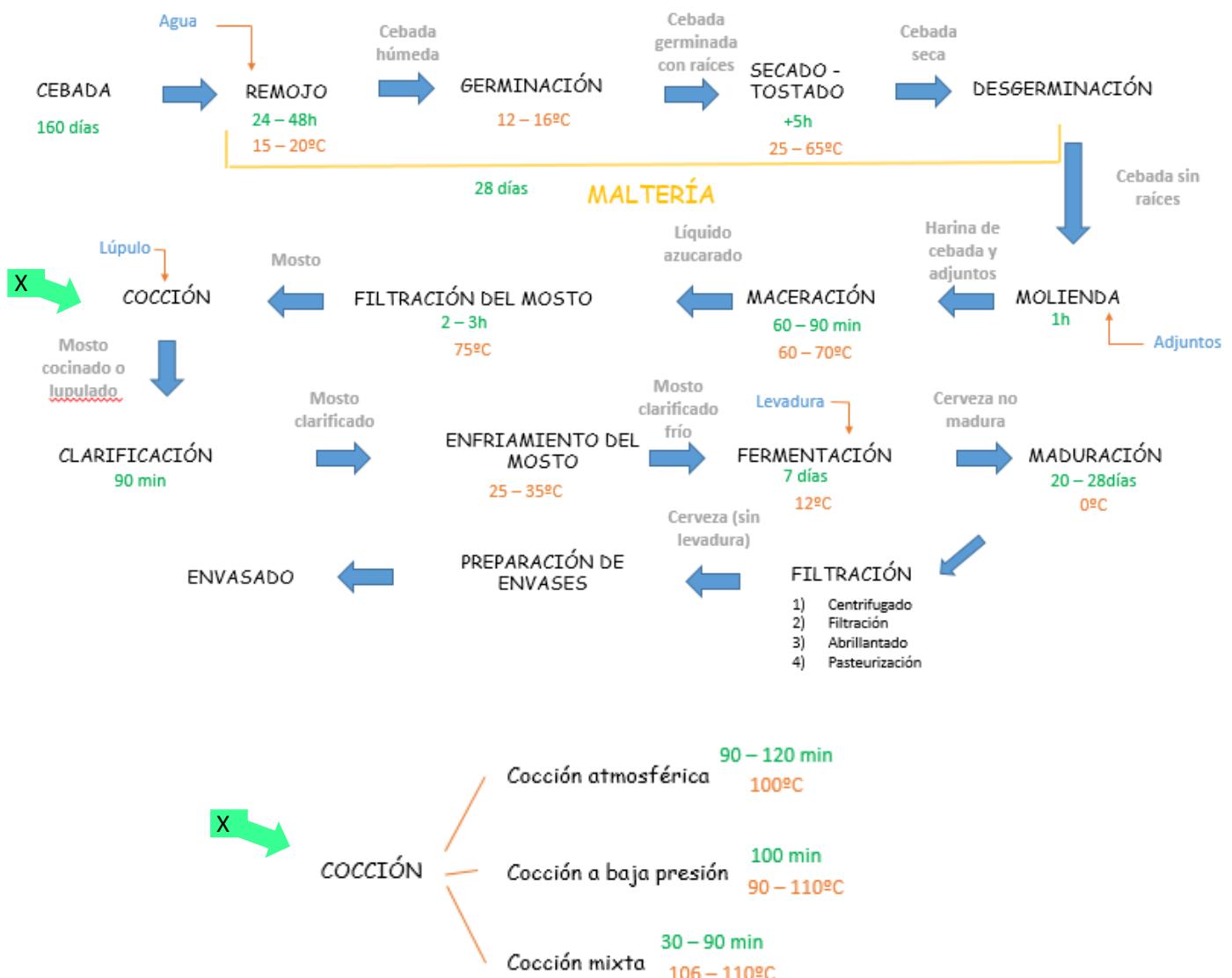


Gráfico 2. Esquema proceso productivo cerveza [Elaboración propia]

## 1. NIVELES ACTUALES DE CONSUMO Y EMISIÓN EN EL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA CERVEZA

Se van a indicar los valores de consumo de los recursos más característicos en la industria cervecera. También se indican los valores de emisión asociados a la generación de residuos, aguas residuales y emisión de gases.

Los recursos consumidos en la industria cervecera son: agua, energía eléctrica, energía térmica y el consumo de materiales.

Los aspectos ambientales más significativos asociados a emisiones son: generación de aguas residuales y generación de residuos. También se tratan las emisiones atmosféricas y la generación de ruido y olores.

Son muchos los tipos de cerveza y distintos los niveles de consumo y emisión que se desprenden de la elaboración de cada uno. No obstante, a continuación se va a mirar el rango de valores que engloban la producción de los distintos tipos de cerveza.

Para fabricar 1 hl de cerveza envasada segundo el Ministerio de Medio Ambiente de España se necesitan aproximadamente los valores recogidos en la Tabla 1:

COMPONENTES NECESARIOS	VALOR
Malta/Adjuntos	16.6 – 20.82 kg
Agua	4.4 – 8.6 hl
Energía térmica	20 – 52.3 kWh
Energía eléctrica	8.4 – 14.4 kWh

Tabla 1. Componentes necesarios según el Ministerio de Medio Ambiente de España [2]

En la fabricación de 1 hl de cerveza envasada según el Ministerio de Medio Ambiente de España las emisiones tienen que estar dentro de los valores que se recogen en la Tabla 2.

EMISIONES	VALORES
Emisiones atmosféricas	CO2 combustión
	NOX
Agua residual	2.5 – 7.2 hl
Residuos sólidos	Bagazo
	Polvo de malta
	Levadura
	Tierra filtrante
	Vidrio
	Plástico
	Cartón
	Metal

Tabla 2. Rango de emisiones según el Ministerio de Medio Ambiente de España [2]

Se observa que los valores son muy variables ya que dependen de diversos parámetros como: capacidad productiva, tipo de cerveza, ubicación geográfica, condiciones climatológicas, tipología de envases, distancia a núcleos urbanos, sistemas de depuración,...

A continuación se van a desglosar de forma más detallada los niveles de consumo y los niveles de emisión.

## 1) NIVELES DE CONSUMO:

### 1. MATERIALES:

Después del agua, el principal ingrediente de la cerveza es la malta de cebada. Otros productos imprescindibles son el lúpulo (en forma de concentrado o extracto) y la levadura, aunque estos se consumen en cantidades mucho menores.

El consumo de malta en la fabricación de 1 hl de cerveza está entre 16.6 – 20.82 [kg/hl cerveza], de lúpulo alrededor de 0.2 [kg/hl cerveza] y de levadura alrededor de 0.01 [hl/hl cerveza], como se anotaba en la Tabla 1.

El agua constituye aproximadamente el 95% en peso del producto. Además de su uso en la elaboración, se usa para limpieza de equipos, circuitos refrigerantes, envasado, sanitarias,... Realmente, el mayor consumo de agua se suele producir en las operaciones de limpieza de equipos y sus instalaciones.

Como ya se ha comentado anteriormente si la composición química del agua de abastecimiento en la zona donde se ubica la instalación no es la idónea para ser empleada directamente como materia prima, es necesario realizar una serie de tratamientos de eliminación y/o adición de ciertos constituyentes minerales hasta ajustar la concentración apropiada de iones, con el fin de evitar efectos perjudiciales en la calidad de los mostos y cervezas y en la propia marcha de los procesos y funcionamiento de los equipos.

Este acondicionamiento previo del agua puede hacer que el consumo se incremente notablemente. Estas pérdidas se producen en forma de concentrados o rechazados si se utilizan métodos basados en la ósmosis inversa o la electrolisis, o como agua procedente de la regeneración de resinas de intercambio iónico.

En la línea de envasado existen dos puntos de elevado consumo de agua: el acondicionamiento de los envases reutilizables y los túneles de pasteurización. También destaca la lubricación de las cintas de transporte en las líneas de envasado.

El consumo de agua en España en la fabricación de 1 hl de cerveza está comprendido entre 4.4 – 8.6 [hl/hl cerveza] (Tabla 1). En referencia a 1 hl de mosto, el consumo de agua se encuentra entre 1.8 – 2.2 [hl/hl mosto] [3]

### 2. ENERGÍA:

Los procesos de la cervecería son relativamente intensos de energía eléctrica y térmica, y el objetivo para cada empresa es desarrollar un proceso sostenible con el mínimo consumo de energía posible.

El coste típico de energía en la producción de cerveza equivale a un 3 - 8% del presupuesto general de una cervecería, aunque depende del tamaño de la cervecería entre otras variables.

Para la producción de cerveza, según el Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España, el 75 % del consumo de energía total es energético y está destinado a producir calor y el 25% restante es eléctrico y está destinado a producir frío.

La energía térmica se utiliza para elevar el vapor en las calderas, la ebullición del mosto y el calentamiento del agua de la cervecería. También se usa en el envasado en el pasteurizador flash. Los porcentajes de energía térmica destinada a cada proceso se recogen en la Tabla 3.

PROCESO	PORCENTAJE
Fermentación	9%
Macerado	10.2%
Cocción	34.7%
Llenado del barril	6%
Filtración	2.55%
Envasado	25.55%
Otros	12%

Tabla 3.Porcentajes de energía térmica en cada proceso (Datos obtenidos de: [4])

Se observa que la demanda de calor más notoria se encuentra en tres zonas principalmente. En la cocción se consume mucha energía térmica porque se tienen que llevar grandes volúmenes de mosto hasta la temperatura de ebullición y mantenerla durante un tiempo (60 – 120 minutos). En el tren de envasado también se consume una gran cantidad de energía térmica debido a que es donde se limpian las botellas reutilizables y barriles usando sosa. La otra zona destacable son los túneles de pasteurización donde se produce la estabilización microbiológica.

El consumo de energía eléctrica se realiza en todos los procesos donde se requiera una refrigeración siendo más notable el proceso de refrigeración de la sala de embotellado. También existe consumo de energía eléctrica en la planta de tratamiento de aguas residuales. Los porcentajes de energía eléctrica destinada a cada proceso se recogen en la Tabla 4.

PROCESO	PORCENTAJE
Aire	6%
Envasado	18%
Cervecería	23%
Refrigeración	40%
Otros	13%

Tabla 4.Porcentajes de energía eléctrica en cada proceso (Datos obtenidos de: [4])

Los procesos donde se requiere sistema de refrigeración son en las operaciones de fermentación y guarda y en los diversos intercambiadores de calor empleados para bajar tanto la temperatura del mosto antes de entrar a los tanques de fermentación como la cerveza antes de entrar al sistema de filtración.

Otras operaciones que también consumen energía pero a menor escala son: envasado, molienda de la malta, generación de aire comprimido en la sala de compresores, la recuperación de CO<sub>2</sub>, el tratamiento del agua de proceso o la planta de depuración de aguas residuales.

Según el Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de Aragón el rango de valores de energía eléctrica en la producción de 1 hl de cerveza en la industria cervecera está entre 8.4 – 14.4 [kWh/hl de cerveza] como se observaba en la Tabla 1.

Como conclusión se puede decir que una planta cervecera bien administrada en España para producir un hl de cerveza suele utilizar 8 – 12 kWh de electricidad, 5 hl de agua y alrededor de 150 MJ ó 41.67 kWh de calor [4]. Cabe destacar que en la actualidad el 60% de la energía total utilizada proviene de fuentes como el gas natural y el carbón. Estos combustibles se usan tanto en la caldera para producir vapor como en la generación de electricidad.

Debido a la importancia relativa de los costes de la electricidad y la alta demanda de vapor en la producción de cerveza se impulsó la generación de electricidad en la propia instalación de producción de cerveza. Actualmente la electricidad cogenerada representa el 22% de la electricidad total utilizada.

Teniendo en cuenta los datos y los porcentajes escritos anteriormente se van a elaborar dos tablas resumen donde se van a recoger los valores necesarios tanto de energía térmica como de energía eléctrica de forma separada para la elaboración de 1 hl de cerveza.

Los datos de energía térmica más destacables se recogen en la Tabla 5:

PROCESO	SUBPROCESO	ENERGÍA TÉRMICA
Materias primas	Estandarización del agua	-
	Molienda (limpieza del grano)	
	Canguilones para almacenamiento	
Maltería	Remojo	-
	Germinación	
	Secado – tostado	
	Desgerminación	
Cocción	Molienda	-
	Maceración	10.2 % = 5 kWh
	Filtración del mosto	2.55% = 1.25 kWh
	Cocción	34.7% = 17 kWh
	Clarificación	
	Enfriamiento del mosto	
Fermentación		9% = 4.41 kWh
Maduración		-
Filtración	Centrifugación	-
	Filtración	
	Abrillantado	
	Pasteurizados Flash	
Preparación de envases		25.55% = 12.52 kWh
Envasado		6% = 2.94 kWh
Otros		12% = 5.88 kWh
TOTAL		<b>49 kWh</b>

Tabla 5. Energía térmica en cada proceso (Elaboración propia)

Teniendo en cuenta los procesos en los que se requiere más energía eléctrica se elabora la Tabla 6 con los datos más relevantes.

PROCESO	ENERGÍA ELÉCTRICA
Aire	6% = 0.72 kWh
Refrigeración	40% = 4.8 kWh
Cervecería	23% = 2.76 kWh
Envasado	18% = 2.16 kWh
Otros	13% = 1.56 kWh
<b>TOTAL</b>	<b>12 kWh</b>

Tabla 6. Energía eléctrica en cada proceso (Elaboración propia)

## 2) NIVELES DE EMISIÓN

### 1. AGUAS RESIDUALES:

El volumen de agua residual que se genera corresponde al agua total consumida descontando la que se incorpora al producto final, la que se evapora en las operaciones de producción y servicios auxiliares y la que queda absorbida en los residuos generados.

El volumen total de agua residual vertida en la fabricación de 1 hl de cerveza es de 2.5 – 7.2 [hl/hl de cerveza] y el agua que no abandona la instalación como efluente residual es de 1.4 – 1.9 [hl/hl de cerveza] como se ve en la Tabla 2.

El volumen total del agua residual producida proviene principalmente de las operaciones de limpieza de equipos e instalaciones, siendo a la vez la corriente que aporta mayor carga contaminante, ya que las soluciones de limpieza además de contener diversas sustancias químicas como agentes de limpieza y desinfección, entran en contacto directo con la superficie de equipos, conductos y depósitos que han transportado o contenido mosto, cerveza o materias primas, incrementando la carga orgánica y la cantidad de sólidos en suspensión entre otros parámetros.

En la línea de envasado, en el acondicionamiento de los barriles y envases reutilizables la corriente residual que se genera en esta zona tiene importancia por la carga contaminante que aporta. Además de un alto consumo y emisión de agua en el túnel de pasteurización.

Otros dos puntos destacables generadores de agua residual es el agua empleada para enfriar el mosto y la que se produce en la planta de tratamiento de agua de proceso.

El agua residual de las cervezas se caracteriza por una serie de parámetros contaminantes, cuyos rangos de valores en kg/hl de cerveza envasada se encuentran en la Tabla 7.

	DQO	Sólidos en suspensión	Nitrógeno total	Fósforo total	Cloruros
<b>Antes de depuración</b>	0.5 – 2.9	0.06 – 0.28	0.01 – 0.06	0.01 – 0.1	0.06 – 0.2
<b>Después de depuración</b>	0.02 – 0.42	0.005 – 0.17	0.0026 – 0.031	0.0011 0.009	0.026 – 0.34

Tabla 7. Parámetros contaminantes de las aguas residuales en kg/hl de cerveza (Datos de [2])

Una de las características a tener en cuenta en las aguas residuales de cervecería es la alta biodegradabilidad, lo que favorece el uso de métodos biológicos en su depuración.

## 2. GENERACIÓN DE RESIDUOS/SUBPRODUCTOS:

La mayor parte de los restos de producción son de carácter orgánico, por lo que pueden ser considerados como subproductos ya que pueden ser aprovechados por otras industrias (alimentación humana, alimentación animal, farmacia,...) o para utilización agrícola como abono orgánico. Dado el posible valor comercial y la elevada  $DBO_5$  es recomendable minimizar el vertido de estos junto a las aguas residuales.

También se generan cantidades elevadas de residuos urbanos (vidrio, cartón, plástico, metálicos,...), derivados de las operaciones de recepción de materia prima y envasado.

Hay ciertos residuos, considerados peligrosos, generados durante el mantenimiento de las instalaciones (aceites usados, tubos fluorescentes, disolventes, residuos de envase peligroso,...) y su gestión debe seguir la reglamentación pertinente.

Las cantidades de residuos están agrupados en cuatro categorías según el Ministerio de Medio Ambiente de España: residuos orgánicos, residuos urbanos, residuos peligrosos y otros.

Los subproductos de carácter orgánico componen el grupo de mayor importancia desde el punto de vista del volumen generado. Es especialmente abundante la generación de bagazo, que son los restos de malta una vez procesada ya que sus valores rondan los 16.99 – 23.09 [kg/hl de cerveza] [2]. El bagazo se genera en la etapa de filtración del mosto, que tiene lugar en las cubas – filtro o en los filtros – prensa. Suelen ser un subproducto apreciado por los ganaderos, sin embargo su salida no es fácil para aquellas zonas donde no existe actividad ganadera.

El segundo subproducto en volumen de generación es la levadura, con valores comprendidos entre 1.4 – 3.61 [kg/hl cerveza] [2]. La levadura se añade en pequeñas cantidades en los tanques de fermentación para transformar los azúcares en etanol y  $CO_2$ . Durante la fermentación se produce una cantidad de levaduras aproximadamente cuatro veces superior a la cantidad introducida y son retiradas de los tanques una vez concluye la fermentación. Parte de esta levadura retirada se vuelve a introducir en los tanques para aprovechar al máximo su actividad fermentativa, pero la mayor parte debe ser gestionada como subproducto aprovechable en otras industrias. La levadura puede servir en alimentación del ganado, en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica. Pero a mayor deshidratación mayor aceptabilidad en el mercado.

El polvo de malta es uno de los principales aspectos ambientales en cuanto a emisiones atmosféricas (0 – 0.49 [kg/hl cerveza][2]). Los sistemas de control de emisión de polvo de malta facilitan la recuperación parcial de este polvo y se puede reintroducir en el proceso o ser utilizada por terceros como alimento para el ganado.

Uno de los mayores problemas de gestión de residuos son las tierras de diatomeas agotadas utilizadas en la fase de filtración de la cerveza, tanto por la cantidad generada, que ronda los 0.11 – 0.45 [kg/hl cerveza] [2], como por la dificultad de encontrar oportunidades de valorización como subproducto. Estas dificultades tienen su base en las características particulares del residuo, matriz inerte calcárea con un alto contenido en sólidos orgánicos y grado de humedad elevada.

Otro de los problemas es la gestión de los lodos de depuradora cuya producción ronda 0.35 – 3.57 [kg/hl de cerveza] [2]. La opción de aprovechamiento más sencilla en el exterior es el compostaje y el uso como abono, siempre que no presente concentraciones de metales pesados por encima de los valores límites legislados.

### *3. OLORES Y RUIDO.*

El olor de la cerveza se asocia a la emisión de vahos de cocción. El vapor de agua de estos vahos arrastra una serie de sustancias volátiles que pueden provocar problemas de olores en el ambiente. Este problema está bastante controlado con los sistemas de recuperación de vahos modernos y de esta forma se aprovecha también su contenido energético. Además, puede haber otros focos de olor como: planta depuración de aguas residuales, almacenamiento inadecuado, ventilación de bodegas, y evacuación de humos de combustión.

En cuanto al ruido, pueden ser procedentes de los vehículos de distribución y de las carretillas, condensadores, torres de refrigeración, ventiladores, transporte interior de materia prima,... Las principales causas de molestias producidas por ruidos son: ubicación de instalaciones en zonas residenciales, escaso mantenimiento de equipos exteriores, actividades nocturnas y problemas de seguridad e higiene laboral en las zonas de servicios auxiliares.

### *4. EMISIONES ATMOSFÉRICAS:*

Los tres grupos principales de contaminantes atmosféricos que pueden ser emitidos en las instalaciones de cerveceras son:

- Gases de combustión
- Partículas en forma de polvo de malta
- CO<sub>2</sub> de fermentación

El mayor foco de emisión a la atmósfera de gases de combustión se encuentra en la sala de calderas ya que es donde se queman los combustibles que sirven como fuente de energía primaria para generar vapor de agua, agua caliente y/o agua sobrecaleñada.

En las calderas se queman dos tipos de combustible: gas natural y/o fueloil. Los parámetros contaminantes característicos son:

- SO<sub>2</sub> (composición del combustible)
- CO<sub>2</sub> (provienie de la combustión).
- CO (condiciones en las que se realiza la combustión: temperatura de combustión, el exceso de aire, la forma de la llama, la geometría de la cámara de combustión, el diseño del quemador,...)
- NOX (composición del combustible y las condiciones operativas de la combustión).

Las ventajas del uso del gas natural como combustible residen en la mínima emisión de partículas y compuestos de azufre y en su gran poder calorífico lo que conlleva mayor rendimiento energético.

Actualmente en España el 78% del combustible empleado es gas natural, el 22% es fueloil y el resto son energías renovables como el biogás en cantidades reducidas.

Los principales valores de los parámetros gaseosos emitidos a la atmósfera desde la sala de calderas en kg/hl de cerveza según el Ministerio de Medio Ambiente del gobierno de España se encuentran en la Tabla 2. De ellos cabe destacar que el más notable es el CO<sub>2</sub> con valores comprendidos entre 4.1 – 27.21 [kg/hl cerveza] [2]

La emisión de gases a la atmósfera en la industria cervecería no suele ser muy importante en condiciones normales de operación en comparación con otros sectores industriales, ya que los procesos de combustión no son tan intensos y las necesidades de combustible son menores por unidad de producto acabado.

Como se ha nombrado anteriormente, las instalaciones que usan gas natural no tienen emisiones de azufre o estas son insignificantes. Los que emplean fueloil, emiten azufre volátil contenido en el combustible aunque actualmente este contenido es inferior al 1%.

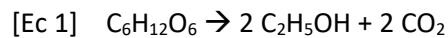
Las emisiones de CO son poco significativas, valores comprendidos entre 0.0 – 0.043 [kg/hl cerveza] [2], generalmente asociadas al funcionamiento incorrecto de calderas o a combustiones incompletas.

La planta de producción de frío emite gases porque usa amoniaco como fluido refrigerante. El NH<sub>3</sub> solo se emitirá a la atmósfera si existen fugas o roturas.

El principal foco potencial de emisión de partículas a la atmósfera es la recepción y transporte de malta. Desde que el grano sale de las malterías hasta que llega a los muelles de recepción de las cerveceras y se transfiere a los silos de almacenamiento de malta, esta es manipulada y transportada varias veces y en diferentes medios, lo cual produce la fricción de unos granos con otros y con las superficies con las que está en contacto, este hecho provoca la generación de polvo de malta que se emite a la atmósfera. También se producen emisiones de polvo de malta en el recorrido de la malta desde los silos de almacenamiento hasta los molinos si las cintas transportadoras no están dotadas de cierres estancos al polvo.

Como se ha comentado el principal foco de emisiones atmosféricas es la emisión de CO<sub>2</sub> y esta depende del consumo específico de combustible y del tipo de combustible y más concretamente de la relación entre el contenido en carbono y el poder calorífico del combustible. Este contaminante se produce principalmente en dos de los procesos de la elaboración de la cerveza: en la caldera donde se produce la cocción y en la fermentación.

La fermentación consiste en transformar la glucosa en etanol y CO<sub>2</sub> con ausencia de aire siguiendo la siguiente reacción química.



$$\Delta G = -230 \text{ kJ}$$

En esta etapa se desprenden cantidades de CO<sub>2</sub> que pueden llegar a ser del orden de 4 kg de CO<sub>2</sub>/hl. Por lo que se puede afirmar que la emisión de este gas en esta parte del proceso procede de la transformación por parte de las levaduras, de los azúcares que fueron extraídos de la malta y adjuntos en la etapa de maceración. [2].

Actualmente, una parte de este CO<sub>2</sub> generado en la planta puede recuperarse para su uso en la misma instalación y de hecho es una opción rentable. Por una parte se aprovecha una sustancia indispensable para la cerveza y por la que en realidad ya se ha pagado al comprar la malta y adjuntos, es decir se evita pagar dos veces por la misma materia prima, e indirectamente se mejora la situación ambiental en cuanto a la emisión de CO<sub>2</sub>. Si bien, acondicionar in situ este CO<sub>2</sub> de fermentación implica un determinado consumo de recursos como energía y agua, pero el nivel de contaminación y consumo es presumiblemente mayor cuando se compra el CO<sub>2</sub> a otras empresas, ya que se produce a partir de combustibles fósiles y también tiene que acondicionarse para uso alimentario. Además existe la desventaja añadida de tener que transportarlo grandes distancias hasta las plantas de elaboración de cerveza.

Es decir, para que el CO<sub>2</sub> recuperado pueda ser utilizado en el proceso de fermentación en el momento, debe ser filtrado, depurado (desodorizado y secado), licuado y almacenado, lo que conlleva un determinado consumo de energía y agua, y esto produce un consumo probablemente mayor que cuando se compra directamente el CO<sub>2</sub> a otras empresas, pero aun así desde el punto de vista ambiental es una opción más beneficiosa.

Hoy en día, se puede llegar a recuperar alrededor del 65% del CO<sub>2</sub> de fermentación en unas condiciones técnicas y económicas adecuadas, lo que supone que se recupere alrededor de 2 – 2.6 kg de CO<sub>2</sub>/hl. En consecuencia de ello, se están desperdiando 1.4 kg de CO<sub>2</sub>/hl [2].

Por último, cabe destacar que la implantación de este sistema puede abastecer casi completamente al proceso de fermentación de dicha instalación.

Como se ha mencionado, el otro proceso en donde se producen la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub> es en el proceso de cocción del mosto ya que es donde se quema el combustible. Actualmente en España el 78% del combustible empleado es gas natural, el 22% es fueloil y el resto son energías renovables como el biogás en cantidades reducidas.

Como se ha nombrado anteriormente, el valor de CO<sub>2</sub> de combustión emitido a la atmósfera desde la sala de calderas en kg/hl de cerveza según el Ministerio de Medio Ambiente del gobierno de España debe estar comprendido entre 4.1 – 27.21 kg de CO<sub>2</sub>/hl [2]

Sabiendo que el proceso de cocción usa como combustible el gas natural, que tiene un rendimiento del 80% y que requerimos de 49 kWh/hl de energía térmica en la elaboración global de 1 hl de cerveza podemos hallar un valor más preciso de dicha emisión de CO<sub>2</sub>.

En primer lugar se halla la cantidad de energía térmica necesaria teniendo en cuenta un rendimiento de la caldera del 80%:

$$[\text{Ec 2}] \quad \frac{49 \text{ kWh/hl}}{0.8} = 61.25 \text{ kWh/hl}$$

Sabiendo que el calor de combustión del gas natural (metano) es de 802 KJ/mol y que el peso molecular del metano es de 16.04 [g/mol] obtenemos la energía por unidad de masa del gas natural:

$$[\text{Ec 3}] \quad 802 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right] * \frac{1}{16.04} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{g}} \right] = 50 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{g}} \right] = 50.000 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Con las dos ecuaciones anteriores obtenemos la cantidad de gas natural que necesitamos para producir la energía eléctrica necesaria para producir un hl de cerveza:

$$[Ec\ 4] \quad \frac{61.25 \text{ [kWh/hl]}}{50.000 \text{ [kg]}} = \frac{61.25 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] * 3600 \left[ \frac{\text{s}}{\text{h}} \right]}{50.000 \text{ [kg]}} = 4.41 \text{ kgCH}_4/\text{hl}$$

Si pasamos estos kgCH<sub>4</sub>/hl a moles de CH<sub>4</sub>/hl usando su peso molecular (16.04 g/mol) obtenemos que:

$$[Ec\ 5] \quad 4.41 \text{ kgCH}_4/\text{hl} * \frac{1}{0.01604 \frac{\text{kgCH}_4}{\text{mol}}} = 274.937 \text{ molCH}_4/\text{hl} = 0.2749 \text{ kmolCH}_4/\text{hl}$$

Sabiendo que la combustión del gas natural sigue la siguiente reacción:



Vemos que la reacción entre el consumo de CH<sub>4</sub> y la producción de CO<sub>2</sub> es 1 mol a 1 mol por lo que la cantidad de moles de CO<sub>2</sub> que se produce es de 0.274937 kmolCO<sub>2</sub>/hl

Sabiendo que el peso molecular del CO<sub>2</sub> es de 44.01 g/mol, obtenemos que la cantidad de kgCO<sub>2</sub>/hl que se produce en el proceso de cocción es de:

$$[Ec\ 7] \quad 274.937 \text{ molCO}_2/\text{hl} * 44.01 \left[ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] = 12100 \text{ gCO}_2/\text{hl} = 12.1 \text{ kgCO}_2/\text{hl}$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta las emisiones a la atmósfera de CO<sub>2</sub> tanto en la fermentación como en la cocción obtenemos la cantidad de emisiones total de CO<sub>2</sub> por hl de cerveza:

$$[Ec\ 8] \quad \text{EmisionesCO}_2 = 1.4 \text{ kgCO}_2/\text{hl} + 12.1 \text{ kgCO}_2/\text{hl} = 13.5 \text{ kgCO}_2/\text{hl}$$

Se observa que el valor de emisiones de CO<sub>2</sub> de la ecuación anterior está dentro de los límites marcados por el Ministerio de Medio Ambiente del gobierno de España.

Sabiendo que el peso molecular del CO<sub>2</sub> es de 44.01 g/mol, la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera en moles es de:

$$[Ec\ 9] \quad 13.5 \text{ kg CO}_2/\text{hl} * \frac{1}{0.04401} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{kgCO}_2} \right] = 306.7486 \text{ molCO}_2/\text{hl} = 0.306748 \text{ kmol CO}_2/\text{hl}$$

## 4. PROCESO POWER TO GAS Y DIMENSIONADO FOTOVOLTAICO ASOCIADO A UNA FÁBRICA MODELO

### 1) PROCESO POWER TO GAS

El proceso Power to Gas es una tecnología que permite almacenar energía eléctrica en forma de gas natural sintético a través de la metanización del hidrógeno producido por电解sis.

Este proceso usa energía eléctrica para disociar una molécula de agua en hidrógeno y oxígeno y de esta forma poder usar dicho hidrógeno para transformarlo en gas natural gracias a la adición de CO<sub>2</sub> siguiendo la reacción de Sabatier. Una vez hemos obtenido el gas natural este se puede inyectar en la red de gas natural, una infraestructura de almacenamiento y transporte [5] [6].

El objetivo de este proceso es reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente para disminuir el cambio climático y obtener un almacenamiento energético que sea 100% respetuoso con el medio ambiente. Para que este proceso sea respetuoso con el medio ambiente la energía eléctrica necesaria se debe obtener usando fuentes de energías renovables.

Se debe tener en cuenta que la energía eléctrica obtenida a través de fuentes renovables tienen un carácter fluctuante lo que produce desajustes entre el suministro y la demanda eléctrica lo que implicará un efecto adverso en la seguridad y estabilidad de la red [5].

Una de las ventajas de este método es que sus características tecnológicas permiten que la conexión a la red eléctrica y a la red del gas se realice a través de un solo sistema energético lo que implica una alta flexibilidad en el equilibrio de la red y un suministro de energía renovable más constante ya que además este método tiene un comportamiento dinámico que permite seguir las entradas de energía fluctuante de las energías renovables [6] [7].

Pero este proceso presenta dos inconvenientes principalmente. En primer lugar la disociación de la molécula de hidrógeno requiere un elevado consumo de energía y en segundo lugar este proceso emite oxígeno residual y su utilización genera problemas. Una solución sería usar una planta de hibridación del Power to Gas con la combustión de oxicombustible. Esta planta lo que hace es mezclar el O<sub>2</sub> con gas de combustión reciclado y este gas actúa como comburente. Este proceso reduce el consumo eléctrico ya que al introducir O<sub>2</sub> en vez de aire no tenemos que calentar el nitrógeno que forma parte del aire [5].

Por lo tanto, el proceso Power to Gas está compuesto por dos etapas, en primer lugar se necesita una电解sis para transformar el agua en hidrógeno molecular, y una segunda etapa denominada metanización donde se transforma el hidrógeno producido en la primera etapa junto con el CO<sub>2</sub> en metano ó gas sintético. Una vez obtenido el gas sintético se inyecta en la red de gas para su almacenamiento y transporte. Todo esto se observa de forma esquemática en el Gráfico 3.

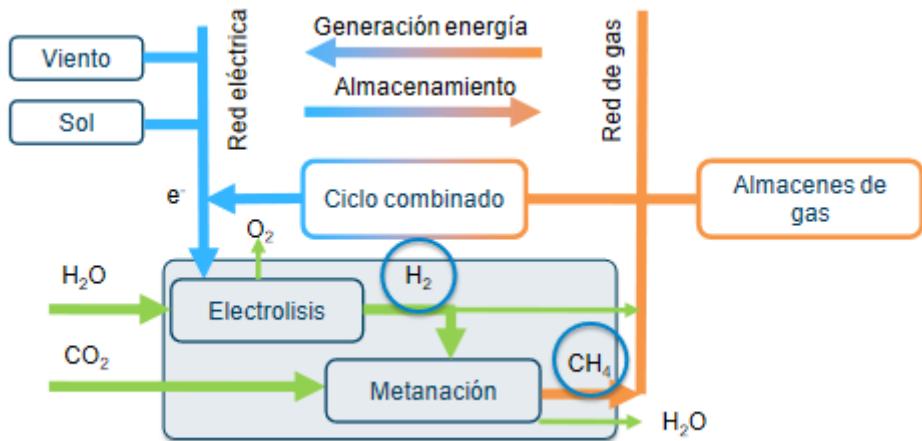


Gráfico 3. Proceso Power To Gas [8]

A continuación se va a explicar cada una de las etapas con más detenimiento.

### 1. ELECTROLISIS:

La electrolisis del agua es un proceso por el cual se genera hidrógeno y oxígeno a partir de la disociación de la molécula del agua mediante el paso de una corriente eléctrica entre dos electrodos (cátodo y ánodo) dentro de la masa de agua (electrolito). La reacción electroquímica global que define este proceso es:



Como se ha nombrado, se requiere gran cantidad de electricidad para la disociación de la molécula de agua. Por lo que, para que este proceso sea respetuoso con el medio ambiente y cumpla los objetivos previstos se requiere que la electricidad provenga de fuentes renovables, como en el ejemplo que se va a estudiar a continuación que usará la energía fotovoltaica.

El hidrógeno obtenido se le denomina como hidrógeno verde debido a su naturaleza renovable. Además la ventaja de este hidrógeno es que tiene menos barreras de implementación que el hidrógeno puro ya que es más seguro, más fácil de transportar y almacenar y más adecuado para aplicaciones industriales [6].

Debido a la gran cantidad de energía eléctrica necesaria se observa que el principal inconveniente de este método es el precio que tendrá el hidrógeno producido, pero este depende principalmente del precio de las energías renovables y como estas se encuentran en pleno desarrollo se estima que en los próximos años el coste disminuirá notablemente.

Para que este coste tampoco sea excesivo se debe utilizar un equipo con alta eficiencia para evitar las pérdidas de energía y con una larga vida útil.

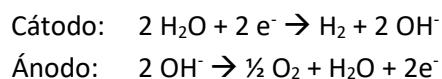
El equipo en el que tiene lugar la electrólisis se denomina electrolizador. Existen varias tecnologías electrolíticas y todas ellas tienen en común la presencia de dos electrodos donde se producen el hidrógeno (reducción, cátodo) y el oxígeno (oxidación, ánodo).

Por ello, los electrolizadores se pueden dividir en tres tipos dependiendo de su electrolito: electrolizadores alcalinos, electrolizadores de óxido sólido (SOEC) y electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) [9]

### 1) ELECTROLISIS ALCALINA CONVENCIONAL:

Es la tecnología más desarrollada, comercial y con el menor coste de capital hasta la fecha. Esta se basa en la inmersión de los dos electrodos, separados por un diafragma poroso, en un electrolito líquido alcalino, generalmente es una disolución acuosa con un 30% en peso de hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH). Esta disolución conduce aniones OH<sup>-</sup> y además trabaja a una temperatura de funcionamiento entre 60°C y 80°C [4]

El funcionamiento es el siguiente: el cátodo es alimentado por agua, que al recibir los electrones del circuito externo, se divide en hidrógeno e iones. Estos iones hidroxilos migran a través del electrolito hasta llegar al ánodo, donde se forma el oxígeno y el agua. Las reacciones que tienen lugar en cada uno de los electrodos son las siguientes:



Es una tecnología simple y barata, de mantenimiento sencillo, ya que no se necesitan metales nobles y es relativamente estable. Además, tienen un funcionamiento óptimo para grandes plantas conectadas a la red de energía.

Estos electrolizadores producen un nivel de pureza del hidrógeno entorno al 99.5 – 99.7 % en volumen. Normalmente trabajan en condiciones nominales, entre 0.2 – 0.3 A/cm<sup>2</sup>, y la producción de hidrógeno está limitada para prever la formación de mezclas inflamables debido a la difusión de gases a través del diafragma poroso ya que esta se produce a bajas densidades de corriente (< 0.1 A/cm<sup>2</sup>). Las eficiencias globales del sistema están en el orden de 47 – 82%. [10]

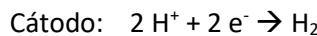
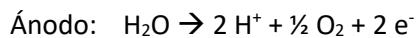
Los electrodos se acaban corroyendo después de un número determinado de ciclos, y no se ajusta a los requerimientos de acumular energía renovable ya que su tiempo de respuesta es elevado.

### 2) ELECTROLISIS DE MEMBRANA POLIMÉRICA PROTÓNICA (PEM):

La PEM ya es comercial a menor escala pero continúa en fase de desarrollo. Son considerados como la opción a largo plazo más prometedora, aunque actualmente solo funcionan para aplicaciones a pequeña o media escala donde la unidad puede ser utilizada para producir hidrógeno utilizando una fuente de energía renovable como la solar.

Estos electrolizadores están constituidos por dos electrodos y un electrolito sólido, una membrana de intercambio protónico. Además, estos electrolizadores trabajan en un rango de temperaturas entre 50°C y 80°C.

Su funcionamiento consiste en que se alimenta al ánodo con agua y se disocia en oxígeno y en un hidrón. Este protón producido se transfiere desde la membrana sólida hasta el cátodo donde se transforma en hidrógeno. Todo esto se refleja en las siguientes ecuaciones:



El hecho de que el electrolito sea un polímero sólido aporta una serie de ventajas. En primer lugar proporciona un diseño compacto. Además, el grosor de la membrana se disminuye, lo que disminuye la pérdida óhmica, lo que conlleva un aumento de la densidad de corriente. De hecho, los electrolizadores PEM tienen las densidades de corriente más elevadas y tienen una respuesta muy rápida y dinámica, que son los requerimientos necesarios para acumular las energías renovables, debidas al carácter fluctuante de éstas. Además, también hace que se permitan operaciones a presiones más elevadas.

Se espera que la eficiencia de estos electrolizadores llegue a ser de hasta el 94%, pero por ahora esto es algo teórico ya que actualmente la eficiencia ronda el 57 – 69% [11]

Debido a que los electrolizadores PEM operan en medios ácidos y con altos voltajes requiere que los materiales de los electrodos están basados en metales nobles y que en las placas bipolares se utilice titanio, en ambos casos con un precio elevado y con los problemas relacionados con su escasez y abastecimiento.

Como conclusión podemos decir que a día de hoy PEM es la tecnología idónea para acumular los excesos de energía renovable pero que continúa en desarrollo.

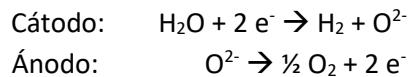
A continuación se va a recoger en la Tabla 8 los valores característicos de los electrolizadores PEM:

CARACTERÍSTICAS	VALORES NUMÉRICOS
Temperatura de la celda	50 – 80 °C
Presión de la pila	< 30 bares
Densidad de corriente	0.6 – 2 A/cm <sup>2</sup>
Voltaje de la celda	1.75 – 2.2 V
Rango de carga parcial	0 – 10%
Pila de consumo energético específico	4.5 – 5.6 kWh / Nm <sup>3</sup>
Sistema de consumo energético específico	4.5 – 7.5 kWh / Nm <sup>3</sup>
Eficiencia de voltaje de celda	57 – 69%
Tasa de producción de hidrógeno del sistema	30 Nm <sup>3</sup> /h
Pila de por vida	<20000h
Tasa de degradación aceptable	< 14 µV/h
Vida del sistema	10 – 20 años

Tabla 8. Valores característicos de un electrolizador PEM [12]

### 3) ELECTRÓLISIS DE ESTADO SÓLIDO:

Es un sistema sólido que trabaja a altas temperaturas (500 - 1000 °C). En este caso, en el lado del cátodo se alimenta de agua y al recibir los electrones, forma iones oxígeno e hidrógeno. Los aniones de oxígeno se trasladan al ánodo a través del electrolito donde se convierten en oxígeno, por ello, se puede afirmar que el electrolito es un conductor de iones oxígeno (O<sub>2</sub><sup>-</sup>). Esto se refleja en las ecuaciones de las reacciones que se producen en ambos electrodos:

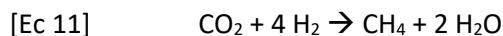


La eficiencia energética es prácticamente del 100%, no necesita metales nobles, puede trabajar a alta presión y es reversible a una pila de combustible.

Sin embargo, debido a sus altas temperaturas aún existen problemas respecto a la durabilidad de sus componentes y no se ajusta a los requerimientos de las energías renovables debido a estas temperaturas. Esto hace que en la actualidad aun no se comercialice. Pero esta condición puede ser una ventaja si se acopla a sistemas en los que se libere calor y éste se pueda utilizar.

## 2. METANACIÓN:

La metanación es el proceso donde se transforma el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub> en metano o gas de síntesis. Esta transformación se produce siguiendo una reacción conocida como reacción de Sabatier y es la siguiente:



Esta reacción es altamente exotérmica por lo que esta favorecida a bajas temperaturas y altas presiones. El valor de energía producido es aproximadamente de 165 kJ [7]

Las ventajas de la metanación, además de que mantiene el alto poder calorífico del gas natural obtenido, evita el tener que adaptar los equipos a la red para mayores cantidades de hidrógeno [6]

Dado el elevado carácter exotérmico de la reacción, el proceso requiere un cuidadoso control del calor para evitar la aparición de puntos calientes que dañen el catalizador pero a su vez se tiene que poder superar la barrera térmica para originar una alta conversión de CO<sub>2</sub>. Este control de temperatura se realiza en reactores habitualmente de lecho fijo y lecho fluidizado [13].

### 1) REACTOR DE LECHO FIJO:

En el caso del reactor de lecho fijo el catalizador se encuentra dentro del reactor en forma de gránulos milimétricos y formando un lecho catalítico estático y homogéneo.

El principal problema de estos reactores es controlar la temperatura del reactor ya que una alta concentración de gases reactivos causa una sobretemperatura que evita la metanación completa de los reactivos. Para controlar este problema se usan varios reactores adiabáticos conectados en serie.

Como ventaja cabe destacar que el calor generado en los reactores adiabáticos se puede emplear en el proceso de电解sis y de esta forma ahorrar costes.

### 2) REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO

Estos reactores operan a mayor escala que los reactores de lecho fijo. En estos reactores las partículas del catalizador son fluidizadas por los reactivos gaseosos generándose de esta forma una mezcla uniforme entre el gas y el catalizador aumentando así la transferencia de calor y consiguiendo condiciones isotérmicas.

Como son reactores que eliminan de manera efectiva el calor se puede emplear de manera individual en lugar de en cascada lo que supone un ahorro de los costes y una disminución de problemáticas en el diseño.

El problema más sobresaliente es que, debido a la fluidización de las partículas del catalizador, se producen colisiones entre estas y las paredes del reactor, lo que causa la abrasión del catalizador y del interior del reactor, lo que se traduce en la desactivación del catalizador en un futuro próximo y en una menor vida del reactor.

Otra desventaja es que debido a la fluidización se pueden generar burbujas que llevan a una conversión incompleta de CO<sub>2</sub>.

## 2) DIMENSIONADO POWER TO GAS Y DIMENSIONADO FOTOVOLTAICO ASOCIADO A UNA FÁBRICA MODELO 100% SOSTENIBLE

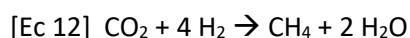
Con todo lo nombrado anteriormente, se va a proceder al cálculo de los parámetros más relevantes para una fábrica modelo totalmente respetuosa con el medio ambiente en cuanto a la emisión de CO<sub>2</sub>.

### 1. DIMENSIONADO POWER TO GAS:

Como se ha expuesto en el apartado anterior, el proceso Power to Gas se divide en dos etapas: metanación y电解. Por lo que, partiendo de las emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas anteriormente para la fábrica modelo, se va a dimensionar la cantidad de hidrógeno producido en la电解 y con ello la cantidad de metano producido en la metanación usando la energía fotovoltaica.

#### 1) METANACIÓN:

Sabiendo que la metanación es el proceso por el cual se transforma el CO<sub>2</sub> en gas natural gracias a la adición de hidrógeno y que la cantidad de CO<sub>2</sub> que produce la fábrica modelo estudiada es 0.306748 [kmolCO<sub>2</sub>/hl] [Ec 9], podemos calcular la cantidad de hidrógeno necesaria siguiendo la siguiente reacción química:



Se observa que la relación CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> es 1 mol a 4 moles, por lo tanto, la cantidad de moles de H<sub>2</sub> que necesitamos para aprovechar por completo la cantidad de CO<sub>2</sub> que se emite es:

$$[Ec 13] 0.306748 \text{ kmol CO}_2/\text{hl} * 4 = 1.226994 \text{ kmol H}_2/\text{hl}$$

Si se convierten estos moles en kilogramos usando el peso molecular del hidrógeno (2.02 g/mol) obtenemos que la cantidad de hidrógeno que se necesita es de:

$$[Ec 14] 1226.994 \text{ [moles H}_2/\text{hl}] * 2.02 \text{ [g/moles]} = 2478.528 \text{ [g/hl]} = 2.47853 \text{ Kg de H}_2/\text{hl}$$

Para producir este H<sub>2</sub> se usan electrolizadores y esto corresponde a la siguiente etapa del proceso Power to Gas, la电解.

#### 2) ELECTROLISIS:

La电解 es el proceso por el cual se obtiene el hidrógeno necesario a través de la disociación de la molécula del agua gracias a la acción de una corriente eléctrica.

En este proyecto se va a usar un electrolizador PEM debido a su característica de respuesta rápida, propiedad indispensable cuando se quiere trabajar con energías renovables ya que estas tienen un carácter fluctuante.

Usando las propiedades de los electrolizadores PEM detalladas en apartados anteriores, se va a calcular el consumo energético que conlleva producir los kg de H<sub>2</sub> necesarios para transformar todo el CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera en gas natural (CH<sub>4</sub>), que en el caso a estudiar son 2.478528 [kg de H<sub>2</sub>/hl] [Ec.14].

Para calcular el consumo energético del electrolizador PEM teniendo en cuenta la cantidad de hidrógeno necesario tenemos que usar las características recogidas en la Tabla 8 donde se consideran condiciones normales (25°C y 1 atm), la mayor eficiencia y el menor consumo ya que se presupone que en el futuro estos electrolizadores irá mejorando sus propiedades. Por lo tanto, el consumo energético específico será de 4.5 [kWh/Nm<sup>3</sup>]. Con este valor y sabiendo que la densidad del H<sub>2</sub> en condiciones normales es 0.0895 [kgH<sub>2</sub>/Nm<sup>3</sup>], se obtiene que el consumo energético es:

$$[Ec 15] \frac{2.478528 \text{ kgH}_2/\text{hl}}{0.0895 \text{ kgH}_2/\text{Nm}^3} * 4.5 \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} \right] = 124.62 \text{ [kWh/hl]}$$

Por lo que se puede suponer un consumo de energía en la producción de H<sub>2</sub> usando un electrolizador PEM de aproximadamente 125 [kWh/hl].

## 2. DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA:

Con todos los datos obtenidos anteriormente se llega a la conclusión de que para producir 1 hl de cerveza se necesitan 12 [kWh/hl cerveza] de energía eléctrica [Tabla 6] y 124.62 [kWh/hl cerveza] [Ec.15] proveniente de la energía eléctrica que consume un electrolizador PEM para producir el hidrógeno necesario para transformar el CO<sub>2</sub> producido en el proceso de elaboración de la cerveza en metano. Por lo que si sumamos ambos valores, obtenemos que la energía necesaria para producir 1 hl de cerveza es de 136.62 [kWh/hl].

Para que la fábrica modelo sea totalmente respetuosa con el medio ambiente, la producción de la energía eléctrica necesaria en el proceso debe hacerse con el uso de la energía renovable y para este estudio se va a proponer el uso de placas solares.

Para el dimensionado de la instalación se van a usar placas solares SCL 320W P1, aptas para la producción industrial, cuyas características se recogen en la Tabla 9.

CARACTERISTICA PLACA SOLAR	VALORES
Potencia máxima (Pmax)	320 W
Voltaje a potencia máxima (Vmp)	45.7 V
Intensidad a potencia máxima (Imp)	9 A
Voltaje en circuito abierto (Voc)	37.1 V
Intensidad de cortocircuito (Isc)	8.63 A
Dimensiones	1.94622 m <sup>2</sup>

Tabla 9. Características placa solar [14]

Otro factor a tener en cuenta en el dimensionado de una instalación fotovoltaica es el lugar donde este situada la fábrica ya que dependiendo de la ubicación la irradiación solar mensual tendrá diferentes valores. La irradiación solar tiene en cuenta la dirección de los rayos del sol y como estos indicen en la tierra, por eso depende de la ubicación, la inclinación de las placas, las sombras, el clima de la zona geográfica,... Además, la radiación influye de manera directa en el rendimiento de los paneles ya que a mayor radiación mayor energía eléctrica se producirá.

En este caso se va a situar la fábrica en Zaragoza (España). Se van a obtener los datos de la irradiancia usando PVGIS. [15]. PVGIS es una calculadora de energía solar fotovoltaica online gratuita, es decir, se usa para estimar la producción de electricidad solar de un parque fotovoltaico ubicado en América, Europa, Asia o África. En este programa se puede variar desde la ubicación hasta la inclinación y orientación de los paneles.

Para la fábrica considerada se han obtenido los datos de la irradiación global para un ángulo de inclinación de las placas solares óptimo y con la ubicación de Zaragoza para los últimos años disponibles, 2014, 2015 y 2016. Estos se recogen en la Tabla 10.

MES	IRRADIACIÓN GLOBAL PARA UN ÁNGULO ÓPTIMO [kWh/m <sup>2</sup> mes]		
	2014	2015	2016
<i>Enero</i>	93.96	132.10	84.24
<i>Febrero</i>	115.51	142.25	135.78
<i>Marzo</i>	184.58	170.01	148.12
<i>Abril</i>	197.67	202.90	163.52
<i>Mayo</i>	209.91	216.28	187.85
<i>Junio</i>	213.65	216.42	208.75
<i>Julio</i>	220.97	223.20	222.10
<i>Agosto</i>	225.22	218.15	226.85
<i>Septiembre</i>	180.15	185.88	187.08
<i>Octubre</i>	164.17	158.26	149.41
<i>Noviembre</i>	100.13	109.77	98.48
<i>Diciembre</i>	114.09	84.30	69.81
<b>TOTAL [KWh/m<sup>2</sup>año]</b>	<b>2 020.01</b>	<b>2 059.52</b>	<b>1 881.99</b>

Tabla 10. Irradiación global para un ángulo óptimo en Zaragoza (Datos obtenidos de [16])

Una vez se han obtenido los datos de irradiancia de la fábrica se va a proceder a realizar los cálculos de la instalación fotovoltaica. Para ello se van a usar los valores del año 2016 ya que es el año más próximo al actual y los valores han sido los mejores hasta la fecha. Además para poder obtener unos valores que se puedan comparar y así suponer asumibles o no los resultados obtenidos se va a considerar una microcervecería ubicada en Zaragoza capital. Una microcervecería es una fábrica cuya producción de cerveza no supera los 18000 hl/año.

Sabiendo que para producir 1 hl necesitamos 136.6187 kWh/hl, para producir 18000 hl/año necesitaremos:

$$[Ec\ 16] \ 18\ 000 \left[ \frac{hl}{año} \right] * 136.6187 \left[ \frac{kWh}{hl} \right] = 2\ 459\ 137.75 \left[ \frac{kWh}{año} \right] = 204\ 928.15 \left[ \frac{kWh}{mes} \right] = 6\ 737.36 \left[ \frac{kWh}{día} \right]$$

Una vez se ha obtenido la energía total, se quiere obtener el número de placas necesarias para producir dicha energía. Para ello se usa la siguiente ecuación [17]:

$$[Ec\ 17] \ E = I_{placa} * V_{placa} * \text{Número de placas} * \text{HSP} * \text{Eficiencia placa}$$

Donde:  $I_{placa}$  y  $V_{placa}$  son características de la placa dadas por el fabricante

Eficiencia de la placa = 0.9

HSP = Hora solar pico

A continuación se va a especificar como se halla el valor de la hora solar pico. La hora solar pico es un parámetro utilizado en el dimensionamiento de instalaciones fotovoltaicas que expresa el tiempo en horas de una hipotética irradiación solar constante de 1000 W/m<sup>2</sup> sobre un determinado emplazamiento. Si la radiación se expresa en kWh/m<sup>2</sup>, las HSP se obtendrán [18]

$$[Ec\ 18] \ HSP = \frac{\text{Radiación} \left[ \frac{kWh}{m^2} \right]}{1000 \left[ \frac{W}{m^2} \right]} * k$$

Como se ha dicho anteriormente, la irradiación depende del emplazamiento, por eso se necesita un factor de corrección  $k$  en función de la latitud de la ubicación y del ángulo de inclinación. Como la fábrica de la que se realiza el estudio se encuentra situada en Zaragoza, se tiene que buscar en las tablas del IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) la latitud para dicha ubicación. La latitud de Zaragoza es de 41.7º. Para mirar en las tablas como no se tiene el valor de 41.7º porque son tablas estándar, se tiene que considerar una latitud de 42º. Se observa que el factor  $k$  depende de la inclinación y del mes, por lo tanto los valores de  $k$  para una inclinación de 30º son:

VALORES DE K PARA INCLICACIÓN DE 30º											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1.36	1.28	1.19	1.09	1.02	1	1.02	1.1	1.23	1.4	1.51	1.48

Tabla 11. Datos obtenidos del IDAE [19]

Utilizando los valores de las tablas anteriores y la fórmula citada se hallan los valores de la hora solar pico mensuales y se recogen en Tabla 12:

HSP (Mensual)											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
114.6	173.8	176.3	178.2	191.6	208.7	226.5	249.5	230.1	209.2	148.7	103.3

**HSP (Anual)** 2210.6044h

Tabla 12. Cálculos HSP

Una vez se han especificado los valores de HSP, la energía necesaria y las características de las placas solares se pueden obtener el número de placas y el espacio necesarios.

Como se ha obtenido anteriormente para que la fábrica sea 100% sostenible se tiene que obtener con el uso de la energía fotovoltaica 2459137.753 [kWh/año] [Ec. 16]. Por lo tanto, el número de placas necesario es:

$$[\text{Ec 19}] \text{ Número de placas} = \frac{2\ 459\ 137.753 \cdot 10^3 \text{ [Wh/año}}{45.7 \text{ [V]} \cdot 9 \text{ [A]} \cdot 2\ 210.604 \text{ [h]} \cdot 0.9} = 3006 \text{ placas}$$

Sabiendo que una placa tiene un tamaño de 1.94622 m<sup>2</sup>, se obtiene que la dimensión necesaria es:

$$[\text{Ec 20}] \text{ Dimensiones} = 5\ 850.34 \text{ m}^2$$

Una vez se han obtenido el número de placas necesarias para que la fábrica estudiada sea 100% sostenible, se han de realizar los cálculo inversos a los anteriores para obtener los valores de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub> producidos en realidad teniendo en cuenta la energía producida por dichas placas mensualmente.

En primer lugar, teniendo en cuenta el número de placas obtenidas, el HSP y las características de las placas solares obtenemos la energía realmente producida cada mes. Se detalla en la Tabla 13:

ENERGÍA PRODUCIDA MENSUALES [kWh/mes]					
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
127 481.58	193 391.00	196 133.08	198 330.00	213 207.00	232 282.6
JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
252 080.31	277 665.34	256048.75	232 754.00	165 468.44	114 966.00

**TOTAL [kWh/año]** 2 459 808.1

Tabla 13. Producción de energía mensualmente [kWh/mes]

Las emisiones reales de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> se hallan como en el apartado de emisiones de CO<sub>2</sub>, usando las reacciones químicas. Las emisiones obtenidas se recogen en la Tabla 14:

PRODUCCIÓN DE H <sub>2</sub> MENSUAL [Kg/hl]											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1.690	2.564	2.600	2.629	2.827	3.079	3.342	3.681	3.395	3.086	2.194	1.524
PRODUCCIÓN DE CO <sub>2</sub> MENSUAL [Kg/hl]											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
9.206	13.970	14.160	14.320	15.398	16.775	18.200	20.053	18.492	16.809	11.950	8.303
PRODUCCIÓN DE CH <sub>4</sub> MENSUAL [Kg/hl]											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2.845	4.580	4.652	4.710	5.102	5.604	6.125	6.798	6.229	5.616	3.845	2.516

Tabla 14. Producción de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> Y CH<sub>4</sub> [kg]

Si se ilustran los valores recogidos en la Tabla 14 obtenemos el Gráfico 4.

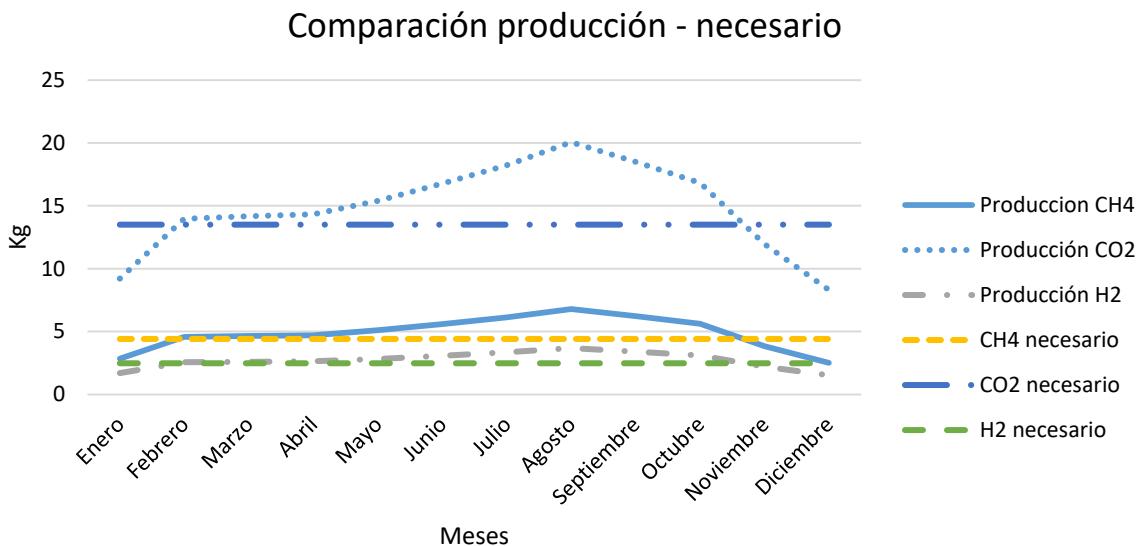


Gráfico 4. Comparación producción CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub> con lo necesario

En el gráfico se observa que si la producción de un elemento es mayor de lo que se necesita de dicho elemento, el mes en el que ocurra esto se procederá a almacenarlo para poder usarlo aquellos meses en los que ocurra de manera contrario, es decir, para usarlo en los meses cuya producción sea menor que lo necesario.

### 3) DIMENSIONADO DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA Y PRODUCCIÓN DE EMISIONES SI ES PARCIALMENTE RENOVABLE.

Como se ha observado en el apartado anterior la dimensión de la instalación fotovoltaica para que la fábrica sea 100% renovable tiene un tamaño considerado, concretamente son necesarias 3006 placas solares.

Por ello, se va a realizar un estudio de distintas casuísticas en las que la fábrica es parcialmente renovable a distintos niveles.

Se van a realizar 7 casos teniendo en cuenta que el caso 1 es el caso estudiado anteriormente en el que la fábrica es 100% renovable. El caso 2 será cuando el 75% de la energía térmica y la energía eléctrica sean renovables. El caso 3 será cuando el 50% de la energía térmica y la energía eléctrica sean renovables. El caso 4 será cuando el 25% de la energía térmica y la energía eléctrica sean renovables. El caso 5 será cuando la producción renovable comprenda el CO<sub>2</sub> emitido en la fermentación y la energía eléctrica. El caso 6 será cuando solo sea renovable la energía eléctrica necesaria en el proceso. Y por último, el caso 7 será cuando la fábrica no utilice energía renovable.

## CASO 2: PRODUCCIÓN RENOVABLE DEL 75% DE LA ENERGÍA TÉRMICA Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

Siguiendo las ecuaciones señaladas en el apartado anterior y teniendo en cuenta que en este caso solo vamos a reutilizar el 75% de la energía térmica necesaria se obtiene que el dimensionado de la instalación fotovoltaica es:

Número de placas	2391
Espacio necesario	4653.412 m <sup>2</sup>

Tabla 15. Dimensionado de la instalación fotovoltaica caso 2

Y por tanto, la cantidad de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> necesaria suponiendo una producción constante y la que realmente se produce mensualmente se observa en el Gráfico 5.

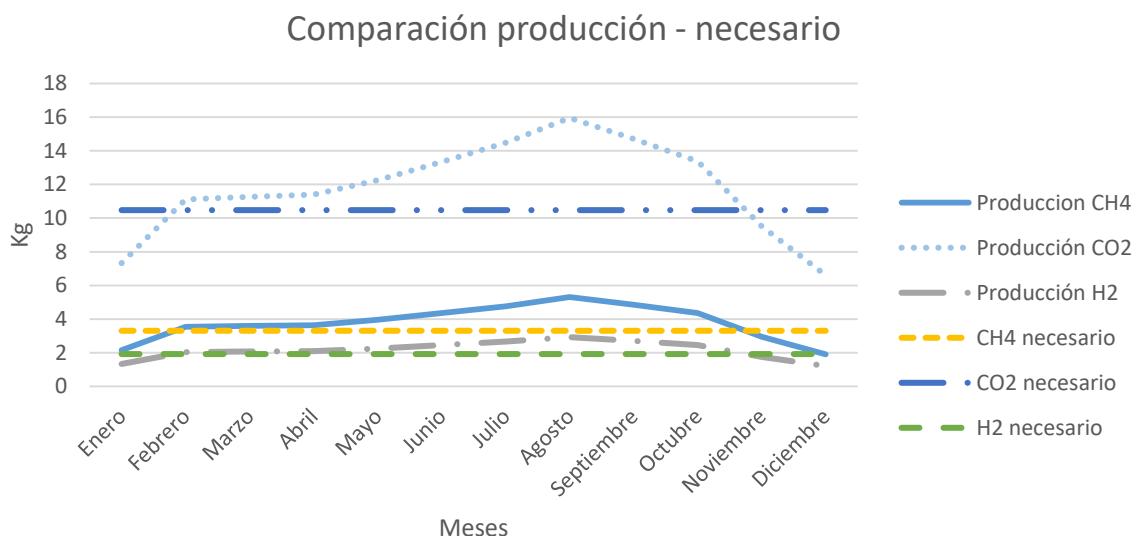


Gráfico 5. Comparación producción CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> con lo que se necesita para el caso 2.

## CASO 3: PRODUCCIÓN RENOVABLE DEL 50% DE LA ENERGÍA TÉRMICA Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

Siguiendo las ecuaciones señaladas en el apartado anterior y teniendo en cuenta que en este caso solo vamos a reutilizar el 50% de la energía térmica necesaria se obtiene que el dimensionado de la instalación fotovoltaica es:

Número de placas	1777
Espacio necesario	3458.433 m <sup>2</sup>

Tabla 16. Dimensionado instalación fotovoltaica caso 3

Y por tanto, la cantidad de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> necesaria suponiendo una producción constante y la que realmente se produce mensualmente se observa en el Gráfico 6.

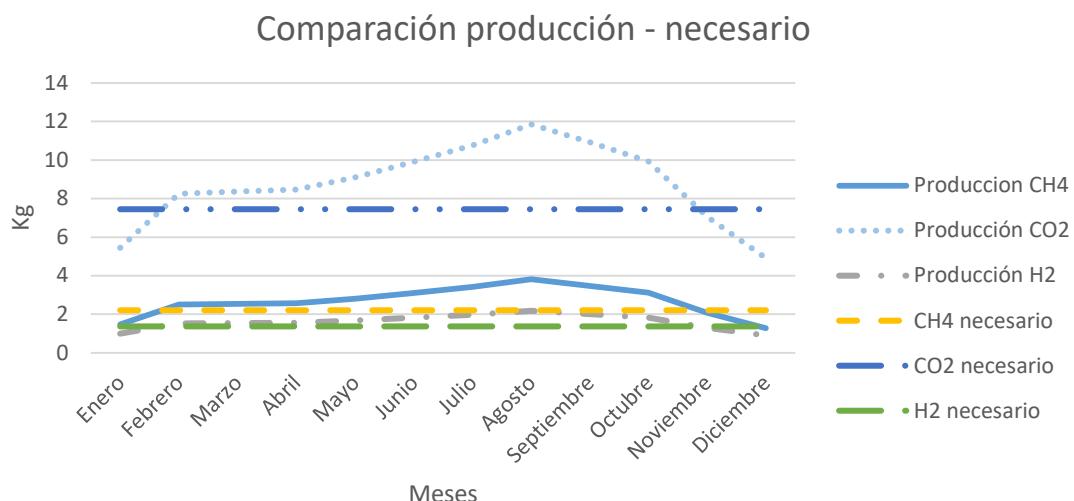


Gráfico 6. Comparación producción CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> con lo que se necesita para el caso 3.

#### CASO 4: PRODUCCIÓN RENOVABLE DEL 25% DE LA ENERGÍA TÉRMICA Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

Siguiendo las ecuaciones señaladas en el apartado anterior y teniendo en cuenta que en este caso solo vamos a reutilizar el 25% de la energía térmica necesaria se obtiene que el dimensionado de la instalación fotovoltaica es:

Número de placas	1163
Espacio necesario	2263.45 m <sup>2</sup>

Tabla 17. Dimensionado de la instalación fotovoltaica caso 4

Y por tanto, la cantidad de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> necesaria suponiendo una producción constante y la que realmente se produce mensualmente se observa en el Gráfico 7.

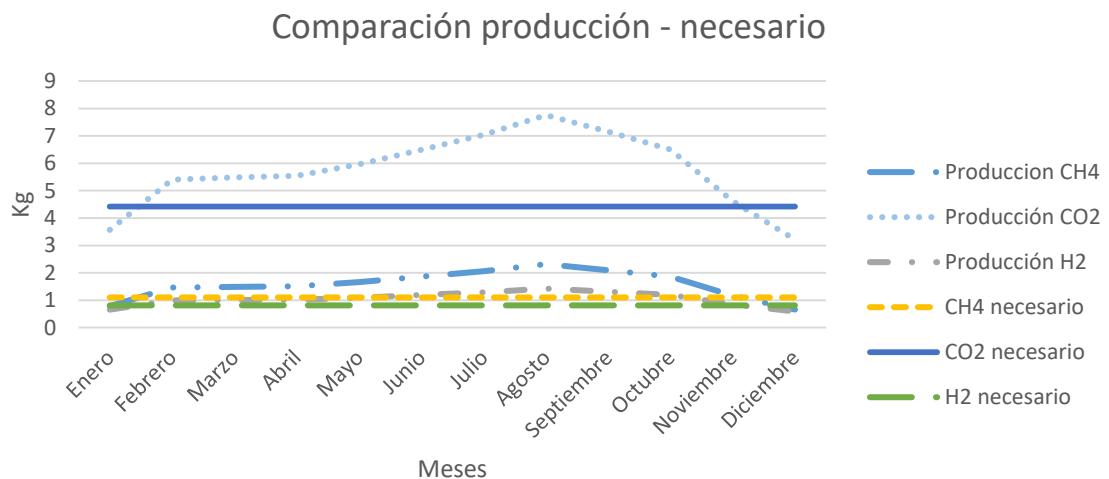


Gráfico 7. Comparación producción CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> con el necesario para el caso 4

## CASO 5: PRODUCCIÓN RENOVABLE EL CO<sub>2</sub> DE LA FERMENTACIÓN Y DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

Siguiendo las ecuaciones señaladas en el apartado anterior y teniendo en cuenta que en este caso solo vamos a reutilizar el CO<sub>2</sub> producido en la etapa de fermentación y la energía eléctrica, se obtiene que el dimensionado de la instalación fotovoltaica es:

Número de placas	549
Espacio necesario	1068.475 m <sup>2</sup>

Tabla 18. Dimensionado instalación fotovoltaica caso 5

Y por tanto, la cantidad de CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> necesaria suponiendo una producción constante y la que realmente se produce mensualmente se observa en el Gráfico 8.

Comparación producción - necesario

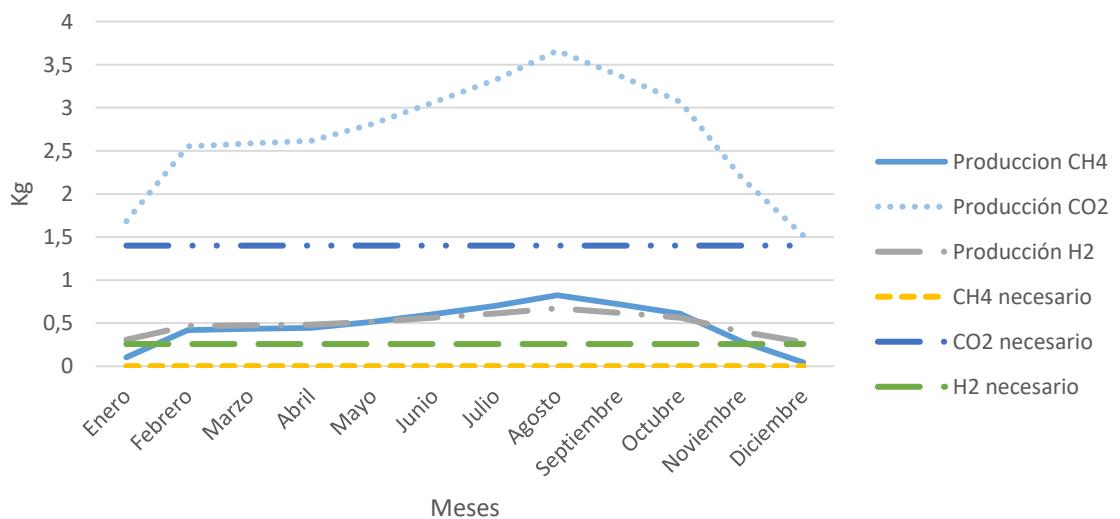


Gráfico 8. Comparación producción CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> con el necesario para el caso 5.

## CASO 6: PRODUCCIÓN RENOVABLE SOLO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.

Siguiendo las ecuaciones señaladas en el apartado anterior y teniendo en cuenta que en este caso solo vamos a reutilizar la energía eléctrica necesaria obtenemos los siguientes resultados en cuanto a la dimensión de la instalación fotovoltaica:

Número de placas	264
Espacio necesario	513.802 m <sup>2</sup>

Tabla 19. Dimensionado de la instalación fotovoltaica

## 5. COSTES DEL DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO POWER TO GAS E INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA PARA UNA MICROSERVECERÍA

Se va a analizar la viabilidad económica del estudio realizado. Para ello se van a tener en cuenta la diferencia de gastos que existen entre la fábrica una vez instalado el método Power to Gas y la energía fotovoltaica y la misma fábrica con misma producción pero sin la recuperación y reutilización del CO<sub>2</sub> y comprando la energía eléctrica y térmica necesaria.

Para llevar a cabo lo dicho anteriormente se va a dividir el apartado en tres partes, en la primera calcularemos los costes del estudio realizado del proceso Power to Gas y la instalación fotovoltaica, en la segunda calcularemos los costes de la microcervecería comprando la energía necesaria y en la última parte realizaremos la comparación entre ambas.

Además, se van a realizar los costes relacionados con todas las casuísticas estudiadas anteriormente y se procederá a una comparación entre ellas.

### 1) COSTES POWER TO GAS E INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA:

Para la instalación del Power to Gas y la energía fotovoltaica se tienen unos costes extras derivados de la compra de los equipos necesarios y de la instalación y consumo de dichos equipos.

Los costes extras que observamos en la utilización de este método son: la compra e instalación de las placas solares para la producción de la energía necesaria, la compra, instalación y consumo de los equipos relacionados con el método Power to Gas como es el electrolizador PEM, el metanizador y los equipos encargados de realizar la captura del CO<sub>2</sub>.

Se debe tener en cuenta que si se usa este método, la fábrica se ahorrara los costes relacionados con la compra de energía eléctrica, ya que esta se produce gracias a las placas solares, energía térmica, ya que esta se produce usando los electrolizadores y los metanizadores, y los costes del mercado de emisiones de CO<sub>2</sub>.

El coste de emisiones de mercado de CO<sub>2</sub> es el gasto económico que deben realizar aquellas empresas que emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera. Este gasto es una herramienta económica que integra en los precios de mercado los costes de los daños causados por gases contaminantes con el fin de que las fábricas tiendan a reducir las emisiones de dichos gases.

A continuación se van a detallar los costes anteriormente citados.

### 1. COSTES INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA:

Desde el 2010 hasta la actualidad han existido avances tanto en la eficiencia como en el coste de los paneles solares, más concretamente se han llegado a reducir los precios hasta en un 80%, por eso se supone que en un futuro cada vez esta tecnología será más efectiva y más barata.

El precio de los componentes de una instalación fotovoltaica se detalla en la Tabla 20:

COMPONENTE	PRECIO (€)	PRECIO SOBRE EL TOTAL (%)
Paneles fotovoltaicos	190 – 250 €/panel	40 – 55%
Inversor solar	1300 – 1600 €	20 – 25%
Estructura soportante	80 – 90 €/2 paneles	10%
Contactor bidireccional	200 – 250 €	3%
Cuadro de protecciones para CC y AC	350 €	5%
Legalización y boletín	300 €	5%
Mano de obra y materiales	750 €	8%

Tabla 20. *Costes placas solares. Datos obtenidos de [20]*

Podemos concluir que en 2020, el precio medio de una instalación fotovoltaica se sitúa en torno a los 300€/m<sup>2</sup> [20].

Recordemos que se han desarrollado diferentes casuísticas con diferentes grados de producción de energía renovable, así que se va a aplicar estos precios a los diferentes casos. Los costes asociados a los diferentes casos teniendo en cuenta el dimensionado de la instalación fotovoltaica se recogen en la Tabla 21.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6
Número de placas	3006	2391	1777	1163	549	264
Dimensión [m <sup>2</sup> ]	5 850.34	4 653.41	3 458.43	2 263.45	1 068.47	513.80
Costes [€]	1 755 101.20	1 396 023.61	1 037 529.88	679 036.16	320 542.43	154 140.60

Tabla 21. *Costes instalación fotovoltaica.*

### 2. COSTES ELECTROLIZADORES PEM:

Como se ha nombrado anteriormente los electrolizadores son los equipos utilizados para producir el hidrógeno necesario en el proceso Power to Gas.

El hidrógeno producido es considerado un hidrógeno verde y limpio por eso se está haciendo especial hincapié en el estudio de la producción de hidrógeno usando este método. Para que este método sea viable es necesario obtener una garantía de producción de hidrógeno a un precio asequible y además competitivo con otros métodos con el mismo fin.

En los últimos estudios realizados, se estima que los costes capitales de los electrolizadores PEM para el año 2030 rondarán los 400 – 960 €/kW. Estas cifras son muy prometedoras pero en la actualidad las investigaciones solo han conseguido llegar a reducir el valor entre 1000 - 1950€/kW [21].

Si usamos un coste de capital para el electrolizador de 1000 €/kW y se supone que la fábrica estudiada trabaja durante 3000 h/año para producir 18000 h de cerveza se estima el coste total de la siguiente manera:

$$[\text{Ec 21}] \text{ Coste [€]} = 1000 \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}} \right] * \frac{\text{Consumo energético} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{hl}} \right] * 18000 \left[ \frac{\text{hl}}{\text{año}} \right]}{3000 \left[ \frac{\text{h}}{\text{año}} \right]}$$

Se van a realizar los costes específicos para cada caso desarrollado anteriormente teniendo en cuenta el coste estándar hallado.

	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>CASO 4</b>	<b>CASO 5</b>
<b>Consumo energético [kWh/hl]</b>	124.62	96.69	68.77	40.84	12.92
<b>Coste total [€]</b>	747 712.58	580 169.57	412 626.59	245 083.54	77 540.53

Tabla 22. *Costes electrolizador*

### 3. COSTES METANIZADOR:

El metanizador es el equipo necesario para transformar el hidrógeno que proviene del electrolizador en gas natural de síntesis al hacer reaccionar este hidrógeno con el CO<sub>2</sub>.

Los costes teniendo en cuenta el mantenimiento y gastos de operación del proceso de metanación y el precio del kWh instalado se estiman de unos 500 €/kW [22].

Al igual que en el caso de los electrolizadores, si tenemos en cuenta un coste capital de 500 €/kW y se supone que la fábrica estudiada trabaja durante 3000 h/año para producir 18000 h de cerveza se estima el coste total de la siguiente manera:

$$[\text{Ec 22}] \text{ Coste [€]} = 500 \left[ \frac{\text{€}}{\text{kW}} \right] * \frac{\text{Consumo energético} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{hl}} \right] * 18000 \left[ \frac{\text{hl}}{\text{año}} \right]}{3000 \left[ \frac{\text{h}}{\text{año}} \right]}$$

Vamos a especificar a cuanto ascenderían estos costes en los casos estudiados anteriormente.

	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>CASO 4</b>	<b>CASO 5</b>
<b>Consumo energético [kWh/hl]</b>	124.62	96.69	68.77	40.85	12.92
<b>Coste total [€]</b>	373 856.29	290 084.79	206 313.30	122 541.77	38 770.27

Tabla 23. *Costes metanizador*

#### 4. COSTE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>:

Para llevar a cabo el proceso Power to Gas se necesita capturar el CO<sub>2</sub> que se produce en la fabricación de la cerveza.

Para capturar el CO<sub>2</sub> primero se debe separar de los demás gases resultantes de la combustión. Luego se comprime y se purifica para facilitar su transporte y almacenamiento.

Los sistemas de captura reducen en un 80 – 90% las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de centrales de combustión. Cabe destacar que el tratamiento de gas natural y en la producción de hidrógeno se produce una corriente de CO<sub>2</sub> relativamente pura y por lo tanto su eficiencia es mayor y su coste será menor [23].

El coste unitario de la captura de CO<sub>2</sub> depende de los diferentes tipos de plantas de combustión y de los procesos industriales.

Aunque se espera que este proceso vaya abaratándose paulativamente gracias a la investigación, en la actualidad se puede considerar los siguientes costes en el proceso de captura de CO<sub>2</sub>.

	€/tCO <sub>2</sub>
<b>Captura</b>	25 – 32
<b>Transporte</b>	4 – 6
<b>Almacenamiento</b>	4 – 12
<b>TOTAL</b>	35 – 50 €/tCO <sub>2</sub>

Tabla 24. *Costes captura CO<sub>2</sub> desglosados. Datos obtenidos de [24]*

Por lo tanto, si se usa únicamente el precio de captura, 32 €/tCO<sub>2</sub>, y lo aplicamos a los casos estudiado obtenemos la Tabla 25:

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
<b>Captura CO<sub>2</sub> [kgCO<sub>2</sub>/hI]</b>	13.5	10.475	7.45	4.425	1.4
<b>Captura CO<sub>2</sub> [tCO<sub>2</sub>]</b>	243	188.55	134.1	79.65	25.2
<b>Coste total [€/año]</b>	7 776	6 033.6	4 291.2	2 548.8	806.4

Tabla 25. *Costes captura CO<sub>2</sub>*

#### 2) COSTE COMPRANDO LA ENERGÍA NECESARÍA:

En este apartado se va a analizar los costes de comprar la energía eléctrica y la energía térmica necesaria en cada caso estudiado. Además se va a analizar los costes que conlleva la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

##### 1. COSTE COMPRA ENERGÍA ELÉCTRICA:

Se tiene que tener en cuenta que hemos estudiado diversos casos. Teniendo en cuenta la energía eléctrica, se pueden dividir en dos principalmente, aquellos en los que se ha obtenido la energía

eléctrica a través del uso de placas solares (Casos 1, 2, 3, 4, 5 y 6) y aquel que compramos la electricidad directamente en el mercado (Caso 7).

Para el caso en el cual compramos la electricidad en el mercado (caso 7) hay que tener en cuenta los siguientes aspectos. En primer lugar se debe considerar la fluctuación del mercado de la electricidad, esto quiere decir que el precio del kWh varía diariamente, lo que conlleva una inestabilidad en la factura de la luz. Aunque en la actualidad existan tarifas que regulan dichos precios, estas regulaciones suelen ser anuales, lo que impide realizar un presupuesto a largo plazo.

También se debe considerar el precio de la potencia eléctrica contratada. Esto quiere decir que aunque se tengan meses con menos producción siempre tienes que tener suficiente energía contratada para abastecer a los meses cuya producción sea máxima.

Teniendo en cuenta todos los factores enumerados anteriormente, se ha estimado un precio del kWh para poder evaluar el coste que conlleva comprar la energía eléctrica para una microcervecería tipo.

El precio estimado de la energía eléctrica es de 0.127 €/kWh [25]. Con este valor se puede aproximar un coste de la electricidad para el caso 7. Los costes asociados a este caso son:

	<b>CASO 7</b>
<b>Energía eléctrica [kWh/h]</b>	12
<b>Energía eléctrica [kWh]</b>	216 000
<b>Coste total [€/año]</b>	27 432

Tabla 26. *Coste comprando energía eléctrica caso 7*

## 2. COSTE COMPRA GAS NATURAL:

En este apartado, al igual que en el caso de la energía eléctrica, se estudia aquellos casos en los que es necesario comprar gas natural.

Hay que tener en cuenta aquellos casos estudiados en los que se obtiene de forma renovable solo un porcentaje de la energía térmica necesaria ya que la restante hay que comprarla en el mercado (caso 2, 3, 4, 5). Así como aquellos casos que toda su energía térmica se obtiene del mercado (caso 6 y 7).

Al igual que la energía eléctrica, el precio del gas natural en el mercado es muy variable. Para poder realizar una comparación entre comprar el gas natural o producirlo en la propia empresa vamos a suponer un precio de 0.058 €/kWh [26].

Por lo que si aplicamos esto a nuestras casuísticas obtenemos:

	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>	<b>CASO 4</b>	<b>CASO 5</b>	<b>CASO 6</b>	<b>CASO 7</b>
<b>Energía térmica comprada [kWh/h]</b>	12.25	24.5	36.75	49	49	49
<b>Energía térmica comprada [kWh]</b>	220 500	441 000	661 500	882 000	882 000	882 000
<b>Costes [€/año]</b>	12 789	25 578	38 367	51 156	51 156	51 156

Tabla 27. *Coste comprando gas natural*

### 3. COSTE MERCADO DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub>:

El mercado de derechos de emisión de CO<sub>2</sub> se creó con el objetivo de estimular la producción renovable y el autoconsumo de energías limpias y con ello la reducción del consumo de energías no renovables como el carbón, el gas natural,...

Por ello, se estipuló penalizar la producción de cada tonelada de CO<sub>2</sub> para lograr una mayor reducción del consumo de energías no renovables. En la actualidad, el precio del gas y de las emisiones de CO<sub>2</sub> se encuentran máximos, por encima de los 35 €/tCO<sub>2</sub>, pero se prevé que este valor siga subiendo como mecanismo de estimulación incluso llegando a los 100 €/tCO<sub>2</sub> en el 2030 [27].

Cuando se habla de derecho de emisión de CO<sub>2</sub> se refiere a los derechos que tienen las empresas para emitir una determinada cantidad de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Estos derechos son transferibles, es decir, se pueden comprar y vender. Es decir, la cantidad de derechos que hay en el mercado es limitada por lo que las empresas deben ajustarse en base a ese límite así que compran o venden derechos en función de sus necesidades. Si las empresas no cumplen estos derechos se les impone una multa económica. Además, el precio de la compra o la venta de estos derechos vienen marcado por la ley de la oferta y la demanda [28] [29].

Se va a calcular, para aquellos casos que en su proceso emitían CO<sub>2</sub> a la atmósfera, el coste que conllevaría la emisión de este gas invernadero suponiendo 100 €/tCO<sub>2</sub>

	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6	CASO 7
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> a la atm [kgCO<sub>2</sub>/hI]</b>	3.02	6.05	9.07	12.10	13.50	13.50
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> a la atm [tCO<sub>2</sub>]</b>	54.45	108.90	163.35	217.80	243.00	243.00
<b>Costes [€/año]</b>	5 445	10 890	16 335	21 780	24 300	24 300

Tabla 28. *Costes mercado de emisiones de CO<sub>2</sub>*

### 3) COMPARACIÓN DE LOS COSTES ENTRE TODOS LOS CASOS ESTUDIADOS:

Se va a realizar una comparación entre todos los casos estudiados anteriormente. Para ello se van a dividir los costes en dos apartados. En el primer apartado se van a estudiar los costes iniciales como la compra de los equipos, la instalación,... para los cuales se va a pedir un préstamo y se pagará anualmente la misma cantidad de dinero. En el segundo apartado se verán reflejados los costes fijos anuales como la captura de CO<sub>2</sub>, la compra de energía eléctrica o térmica,...

#### 1. COSTES INICIALES

Como se ha indicado para los costes de compra e instalación de los equipos se va a solicitar un préstamo que tendrá una cuota fija anual, de esta forma la inversión inicial es asequible de asumir.

Actualmente, los bancos ofertan préstamos para las empresas con un interés entre el 5 y el 10%. Si se solicita un préstamo a 25 años con un interés del 5%, el coste mensual que debe realizar la empresa se expresa en la siguiente ecuación:

$$[\text{Ec 23}] \text{ Coste mensual fijo} = \frac{\text{Costes totales [€]}}{\frac{1 - \left(1 + \frac{0.05}{12}\right)^{-(25 \text{ años} * 12 \text{ meses})}}{\frac{0.05}{12}}}$$

Se van a recoger en la Tabla 29 los costes iniciales teniendo en cuenta la instalación de las placas solares, los electrolizadores y los metanizadores, y aplicando la anterior ecuación, los costes fijos anuales para subsanar el préstamo.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6	CASO 7
<b>Costes iniciales [€]</b>	2 876 670.07	2 266 277.96	1 656 469.76	1 046 661.48	436 853.23	154 140.62	0
<b>Costes mensuales préstamo [€]</b>	16 816.73	13 248.44	9683.56	6118.68	2553.80	901.09	0
<b>Costes anuales préstamo [€]</b>	201 800.73	158 981.22	116 202.69	73 424.15	30 645.60	10 813.09	0

Tabla 29. *Costes amortización para cada caso*

## 2. COSTES FIJOS ANUALES:

Los costes fijos anuales recogen el coste del préstamo calculado anteriormente, el coste de la captura de CO<sub>2</sub>, el coste de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, y la compra de energía eléctrica y térmica para aquellos casos en los que sea necesario.

Se van a agrupar todos estos costes anuales en la Tabla 30 especificando para cada uno de los casos estudiados anteriormente:

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6	CASO 7
<b>Costes anuales préstamo [€]</b>	201 800.73	158 981.22	116 202.69	73 424.15	30 645.60	10 813.09	0
<b>Coste captura CO<sub>2</sub> [€]</b>	7 776.00	6 033.60	4 291.20	2 548.80	806.40	0	0
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> [€]</b>	0	5 445	10 890	16 335	21 780	24 300	24 300
<b>Compra energía eléctrica [€]</b>	0	0	0	0	0	0	27432
<b>Compra gas natural [€]</b>	0	12 789	25 578	38 367	51 156	51 156	51 156
<b>TOTAL [€/año]</b>	209 576.72	183 248.82	156 961.89	130 674.95	104 388	86 269.09	102 888

Tabla 30. *Costes fijos para cada caso.*

## 6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:

Una vez se han obtenido los costes anuales que deberá llevar a cabo la fábrica para implantar el método propuesto se van a examinar las cifras obtenidas.

De manera global, se observa que a mayor porcentaje de uso de energía renovable tiene la fábrica, mayor inversión inicial se requiere y por lo tanto mayor coste conlleva la implementación del método.

Si se halla la diferencia entre la fábrica sin uso de energía renovable (caso 7) y todas las casuísticas estudiadas obtenemos la Tabla 31:

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6	CASO 7
<b>COSTES TOTALES [€/año]</b>	209 576.72	183 248.82	156 961.89	130 674.95	104 388	86 269.09	102 888
<b>DIFERENCIA [€/año]</b>	106 688.72	80 360.82	54 073.89	27 786.95	1 500	-16 618.91	0

Tabla 31. *Diferencia entre las diversas casuísticas en comparación con el caso 7.*

Observamos que el uso únicamente de placas solares para obtener la energía eléctrica necesaria en el proceso (caso 6) es beneficioso en comparación con no usar nada de energía renovable. Y que conforme aumentamos el porcentaje de energía renovable en la fábrica el coste va aumentando de manera elevada.

A primera vista se observa que implantar el método de manera totalmente renovable es inviable debida a la gran inversión inicial en equipos (caso 1), pero implantar el método con un 25% de energía renovable (caso 4) el coste es mucho menor y sería realizable.

Además, cabe destacar que esta tecnología está en pleno desarrollo en la actualidad por lo que los costes de todos los equipos utilizados en el proceso Power to Gas van a tender a abaratarse en un futuro cercano.

Otro factor a tener en cuenta es el precio al que puede ascender la cerveza si proviene de fuentes renovables. En la actualidad ya se comercializa la cerveza ecológica, una cerveza cuyos ingredientes provienen de fuentes no dañinas para el medio ambiente. Esta cerveza comparada con una cerveza estándar de la misma marca tiene un precio mayor, aproximadamente de 1 – 2 €/litro por encima de la estándar.

En el caso de la cerveza producida con el método Power to Gas, aunque sus ingredientes no provengan de un mercado ecológico, sus emisiones de contaminantes son nulas y por tanto su compromiso con el medio ambiente es tal que se podría vender dicha cerveza a un precio más elevado que la estándar y de esta forma recuperar con anterioridad la inversión realizada en los equipos necesarios en el proceso.

Para visualizar esto de forma general se va a realizar un cálculo a gran escala suponiendo una microcervecería cuyas ventas ascienden a 18000 [hl/año] y un aumento de 1 [€/litro de cerveza] debido a su venta en un mercado sostenible:

$$[\text{Ec 24}] \text{ Beneficio extra} = 1800 \ 000 \left[ \frac{1}{\text{año}} \right] * 1 \left[ \frac{\text{€}}{\text{litro}} \right] = 1800 \ 000 \text{ [€/año]}$$

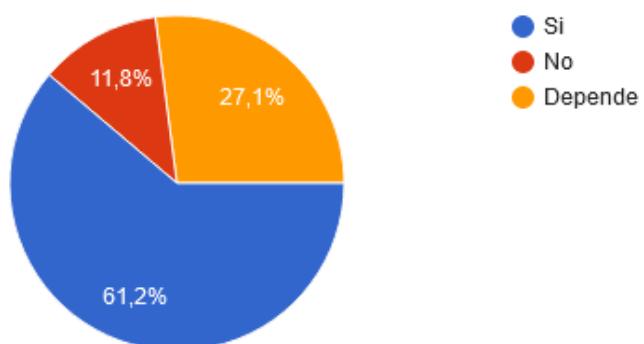
Se observa que aumentando 1 [€/litro de cerveza] los beneficios anuales son mucho mayores que vendiendo la cerveza a un precio estándar, y con este beneficio, se puede subsanar de manera holgada los costes extras de 107 000 [€/año] (caso 1) provenientes de la instalación del proceso estudiado y con todo ello se obtendrían unos beneficios globales de 1 693 000 [€/año].

La cuestión es si al aumentar el precio de la cerveza la población compraría dicho producto por un precio más elevado. Para resolver este problema se ha llevado a cabo una encuesta preguntándoles a los consumidores.

De las personas que realizaron la encuesta, el 67.8% eran mujeres y el 32.2% eran hombres. La edad de los encuestados eran muy diversa, donde el 52.9% eran personas entre 18 y 30 años, el 23% entre 45 y 60 años, el 11.5% entre 30 y 45 años y el resto eran personas de más de 60 años.

Los resultados obtenidos en la encuesta apuntaban que aunque alrededor del 50% de los encuestados nunca habían consumido cerveza ecológica, solo el 12% no estaría dispuesto a pagar un poco más por la misma cerveza aun sabiendo que proviene de energía sostenible. De los restantes, el 55% la compraría esporádicamente y el 33% para el consumo habitual en el hogar. Esto se observa de forma más detallada en el Gráfico 9.

¿Estaría dispuesto a pagar un poco más por el precio de una cerveza si sabe que su fabricación es respetuosa con el medio ambiente?



Si has contestado que SI o DEPENDE en la pregunta anterior. Comprarias estas cervezas sostenibles:

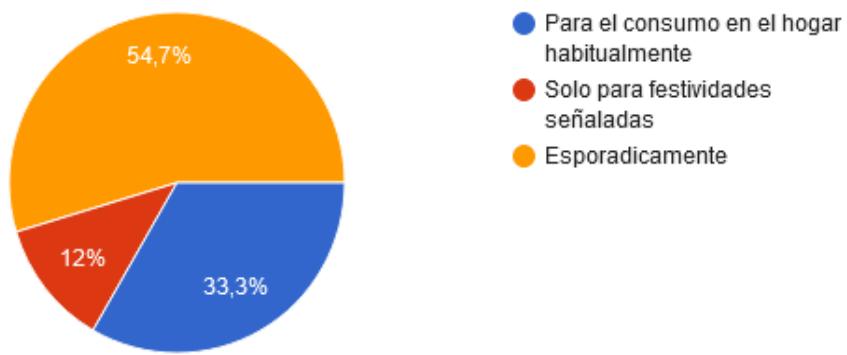


Gráfico 9. Encuesta a los consumidores (elaboración propia).

Con esto podemos concluir que actualmente la población está empezando a concienciarse con el medio ambiente y por ello sería una opción viable el aumentar el precio de la cerveza para subsanar la inversión necesaria para el proceso de manera más eficaz y rápida.

## 7. CONCLUSIÓN:

El presente trabajo ha evaluado la viabilidad económica del aprovechamiento y la utilización del CO<sub>2</sub> que emite una microcervecería, que produce 18000 hl al año, situada en Zaragoza capital.

La importancia del aprovechamiento y la utilización del CO<sub>2</sub> que emite una fábrica cualquiera residen tanto en la conciencia social de disminuir la contaminación atmosférica del planeta como en los problemas derivados del consumo de recursos fósiles.

En el caso de la fábrica estudiada el recurso fósil que emplea como fuente de energía calorífica es el gas natural. El problema de usar estos recursos fósiles es que suelen ser recursos no autóctonos y esto implica una dependencia energética de otro país, además que puede que este país no tenga una estabilidad política lo que origina precios volátiles y problemas con su comercialización.

La concienciación de la población y de los representantes políticos cada vez es más notoria debido a que se observan graves problemas mediambientales en el planeta ya en la actualidad. Por todo ello en el futuro más próximo las leyes van a ser más estrictas en cuanto a las emisiones de contaminantes a la atmósfera y paulatinamente todas las fábricas van a ir mejorando sus prestaciones para adecuarse a estas modificaciones legislativas. Por eso es importante realizar estudios comprometidos con estas nuevas modificaciones.

Por todo ello se ha realizado un estudio de una fábrica cervecera en España cuyas emisiones contaminantes al medio ambiente sean nulas, en otras palabras, se ha realizado un estudio donde la fábrica sería 100% renovable y sostenible.

Para ello se ha estudiado la implantación del proceso Power to Gas de manera sostenible a una fábrica modelo. Este método aprovecha el CO<sub>2</sub> que emite la fábrica y lo transforma en gas natural, el combustible usado en las calderas de la fábrica. Para esta transformación se requiere hidrógeno y energía eléctrica. Para que dicho proceso sea sostenible esta energía debe provenir de fuentes renovables, en el caso a estudiar se han empleado placas solares.

En cuanto a la viabilidad económica se han estudiado diversas casuísticas con distintos porcentajes de energía renovable. En concreto, se han realizado 7 casuísticas que comprenden desde una fábrica modelo 100% sostenible a una fábrica cuya procedencia de energías renovables sea nula.

Para analizar dichos costes, se han dividido en dos partes. La primera parte se comprende de los costes iniciales que conllevan la compra e instalación de los equipos necesarios para aplicar el método Power to Gas para los cuales se ha solicitado un préstamo para su financiación, y la segunda parte en la que se analizan los costes anuales totales que debe realizar la empresa teniendo en cuenta tanto el pago del préstamo como los gastos fijos que conlleva la empresa. Todo ello partiendo de que la cantidad de producción y las ventas son las mismas para todos los casos de esta forma se realiza una comparación solo de los gastos extra que conlleva dicho proceso.

Se observaba que implementar el método de manera totalmente sostenible no era viable a primera vista, pero si la fábrica tenía menor porcentaje de energía renovable los costes se disminuían notablemente. Además, de que la tecnología utilizada está en pleno desarrollo y en el futuro se espera que la inversión inicial disminuya debido a los avances tecnológicos.

Además, se debe tener en cuenta que al ser una cerveza con cero emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera puede ser considerada como sostenible lo que le abre las puertas al mercado ecológico y por tanto a precios de venta más elevados.

## 8. ANEXO 1:

### 1. RECEPCIÓN DE MATERIAS PRIMAS:

Para fabricar la cerveza necesitamos 5 materias primas: malta, agua, levadura, lúpulo y en ocasiones adjuntos.

#### 1) CEBADA:

La malta se obtiene a partir de la cebada. Tenemos dos tipos de cebada, las cebadas de invierno, que se siembran en Septiembre, y las cebadas de verano, que se siembran en Abril. Los tipos de cebada dependen del arreglo de los granos en la espiga. Para la fabricación de cerveza se emplea la cebada de dos hileras.

#### 2) AGUA:

La composición de agua influye de manera notoria en la calidad de la cerveza producida, por lo que en alguno casos resulta imprescindible una estandarización del agua del proceso para que no se produzcan variaciones en el sabor y en las características de la cerveza, además de evitar problemas en los procesos de extracción, transformación enzimática y precipitación que se producen en las distintas etapas de la fabricación de cerveza.

Otro factor que influye en el sabor y en la composición química de la cerveza es la dureza del agua ya que define el tipo de fermentación que se va a llevar a cabo en la elaboración de la cerveza. La dureza del agua viene definida por su contenido o concentración de calcio (Ca) y de magnesio (Mg) en contacto con los terrenos de donde se extrae el agua (por eso las cervezas de calidad con denominación de origen nunca son elaboradas fuera de su ubicación original).

Por ello, dependiendo del tipo de fermentación a realizar necesitaremos agua con distinta composición. Para cervezas de baja fermentación se necesita agua blanda con poca cal, y para cervezas de alta fermentación se necesita agua dura con muchas sales.

Para obtener agua de baja mineralización se puede realizar los siguientes procesos:

- Descarbonatación: consiste en reducir la alcalinidad produciéndose bicarbonatos.
- Desmineralización: consiste en la eliminación de los materiales sólidos disueltos en el agua a través de la reducción de los iones. Dentro de este apartado destacan los siguientes procesos:
  - Electrodiálisis: En este proceso los iones son transportados a través de una membrana semipermeable bajo la influencia de un potencial eléctrico, es decir, su funcionamiento requiere energía eléctrica.
  - Osmosis inversa: Esta técnica consiste en filtrar agua a presión usando una membrana semipermeable, los sólidos se quedarán retenidos en un lado de la membrana y el líquido purificado pasará al otro lado.

- Cartuchos de carbón activo: Debido a las propiedades del carbón activo, este es capaz de absorber el cloro y otras partículas diminutas disueltas en el agua y de esta forma obtener agua purificada.

### 3) LEVADURA:

La levadura es un hongo unicelular cuya función es convertir los azúcares fermentables del mosto en alcohol y en gas carbónico. Para su uso en la fabricación de cerveza se prepara en laboratorios a partir de cepas reutilizables varias veces.

La levadura es esencial para el éxito o fracaso de la fermentación y por lo tanto el maestro cervecero deberá utilizar la más adecuada para obtener un buen resultado en la cerveza final. En la actualidad se usan dos tipos de levaduras:

- Levadura de fermentación alta: Se caracteriza porque fermenta a altas temperaturas (entre 15°C y 25°C), y además, al finalizar la fermentación, esta levadura asciende a la superficie de la cuba donde se recoge para reutilizarla.
- Levadura de fermentación baja: se caracteriza porque fermenta a temperaturas más bajas (entre 5°C y 15°C), y al finalizar la fermentación se deposita en el fondo de la cuba.

Por lo tanto, según el tipo de levadura tendremos un tipo de fermentación diferente y está dependerá del tipo de cerveza deseada. Por ejemplo, una cerveza de fermentación alta sería una cerveza Ale y una cerveza de fermentación baja sería una cerveza negra.

### 4) LÚPULO:

El lúpulo es una planta herbácea que se añade al mosto para proporcionar aroma y amargor e inhibir la actividad microbiológica debido a sus propiedades antisépticas, es decir, los polifenoles del lúpulo reaccionan con las proteínas indeseadas de la malta y las hacen insolubles de forma que permitan su filtrado posteriormente. Además, el lúpulo contribuye a una buena conservación de la cerveza.

La composición del lúpulo se observa en la Tabla 32:

COMPUESTO	PORCENTAJE
Sustancias amargas	18.5%
Aceites	0.5%
Polifenoles	3.5%
Proteínas	20%
Inorgánicos	8%

Tabla 32. Composición del lúpulo (Datos obtenidos de: [30])

## 5) ADJUNTOS:

Los adjuntos pueden ser: arroz, maíz, trigo, cebada, tapioca y azucres. Los adjuntos se añaden a la malta para aumentar su contenido de almidón, y por tanto, el porcentaje de azucres fermentables.

En la legislación española solo se permite un máximo del 50% de adjuntos en la composición del mosto, es decir, para ser considerada cerveza como mínimo tendrá que contener un 50% de cebada malteada.

Los granos de cebada se limpian para quitar granos partidos, piedras y ramas, para ello se realiza una molienda. Una vez se tienen los granos de cebada limpios se almacenan en silos usando cangilones en función de su tamaño. En estos silos tienen que estar almacenados durante 160 días con ventilación, temperatura y humedad controlada.

## 2. MALTERÍA:

Los granos de cebada se convierten en malta por medio de la germinación controlada para que el grano tenga mayor concentración de azucres fermentables y otros nutrientes. Este proceso dura aproximadamente 8 días y se desarrolla en cuatro etapas principalmente: remojo, germinación, secado – tostado y desgerminación.

### 1) REMOJO:

Los granos de cebada con humedad inicial del 12 – 13% son sumergidos en agua con una determinada temperatura y oxigenación para alcanzar una humedad final del 43 – 44% [1].

El remojo se produce en las tinas de remojo, que consisten en un depósito de acero inoxidable cilíndrico con inyectores de aire, una rejilla, rebosaderos (para el lavado de la cebada), pulverizadores y un sistema de bombeo que permita el vaciado y transporte de la cebada a la caja de germinación.

Durante el remojo, el grano de cebada experimenta una serie de transformaciones que podemos resumir en dos etapas:

- Respiración: En esta etapa el grano consume azucres y libera agua, anhídrido carbónico y calor.
- Fermentación: Se producen en el grano la formación de sustancias indeseables debido a la falta de oxígeno.

Para que no se produzcan estas sustancias indeseables no se debe facilitar el desarrollo de microorganismos, por eso este proceso se realiza a una temperatura comprendida entre 15 y 20°C.

Este periodo tiene una duración de tiempo muy variable pero se comprende entre 24 y 48 horas habitualmente.

## 2) GERMINACIÓN:

Los granos humedecidos se almacenan en germinadores o saladines. En ellos se produce la germinación que consiste en un desarrollo de enzimas. Este proceso ocurre gracias a unas corrientes de aire de 12°C a 16°C [31] y agua para mantener constante la humedad de dichos granos, además de unos agitadores que los remueven y evitan que las raíces que se forman se enreden.

Hay que tener en cuenta que en el grano se produce un proceso respiratorio y por tanto una liberación de CO<sub>2</sub>. Además, en la germinación se libera calor, por lo tanto, se debe refrigerar para corregir la temperatura del lecho del grano ya que un calentamiento excesivo aceleraría el proceso de germinación debido al incremento en la actividad vital del grano y se desarrollarían microorganismos.

El proceso de germinación acaba cuando el tallo embrionario de la cebada es ¾ partes del largo del grano y se obtiene lo que se denomina malta verde.

## 3) SECADO – TOSTADO:

Para favorecer la conservación de la malta debemos retirar el agua absorbida por el grano. Para ello usamos un flujo constante de aire seco desde los 60°C hasta los 85°C, reduciendo de esta forma el porcentaje de humedad en el grano hasta el 5% [31]

Esta operación de secado – tostado se realiza en el horno de secado. Y consta de dos fases:

- Primera fase: Consiste en una fase de desecación a temperatura moderada. Se produce actividad enzimática y el calor que recibe el grano se aprovecha en la evaporación del agua. La temperatura del aire ronda los 50 – 70°C y la temperatura de la malta los 25 – 30°C [3]
- Segunda fase: Consiste en un calentamiento. Cuando el grano tiene menos del 10% de humedad parte del calor aportado se emplea en aumentar la temperatura de la malta (a 60 – 65°C). La temperatura del aire se va incrementando hasta alcanzar un valor máximo que depende del tipo de malta que se esté fabricando. Para una cerveza pálida se necesitan 5 horas a 80°C y para una cerveza negra se necesitan 5 horas a 100 – 105°C [3]

## 4) DESGERMINACIÓN:

Se deben eliminar las raíces formadas en la germinación, por eso se extraen por medio de frotación en zarandas. Aproximadamente 100 kg de malta producen de 3 a 5 kg de raicillas. Las raíces extraídas se venden como producto agrícola para la alimentación de animales [3]

Una vez se han realizado las cuatro etapas se obtiene malta procesada cuyo aspecto es dorado, seco y frágil. Esta malta se almacena durante 4 semanas como mínimo en silos para que aumente el contenido de agua hasta alcanzar un 4 – 5% [3]

### 3. COCCIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DEL MOSTO:

En esta etapa se obtiene el mosto cocinado. Para ello se tienen 6 etapas: molienda, maceración, filtración del mosto, cocción, clarificación y enfriamiento del mosto. Se van a explicar dichas etapas a continuación.

#### 1) MOLIENDA:

La malta obtenida en el proceso anterior y los adjuntos son enviados a la molienda para ser triturados y reducir su tamaño para permitir una maceración adecuada ya que el objetivo de la molienda es aumentar la superficie de contacto de la harina con el agua para facilitar la digestión del almidón lo más rápido y eficiente posible, lo que conlleva a un aumento del rendimiento del extracto.

El proceso consiste en hacer pasar los granos y los adjuntos por molinos de rodillo o de martillo. Es importante que la cáscara permanezca tan entera como sea posible por dos motivos, el primero es que si la cáscara se desintegra demasiado el tamizado posterior para su eliminación no será efectivo, y el segundo es que la cáscara actúa como filtro natural que nos ayudará a separar el mosto de los granos con gran facilidad.

Para ello tenemos dos técnicas, el molido en seco y el molido en húmedo:

- Molido en seco:

Se usan molinos de rodillos. Los granos pasan entre los rodillos (que giran en sentido contrario) y se van rompiendo y moliendo a un tamaño que depende del ajuste de la distancia entre los rodillos y de esta forma se separa también la cáscara.

En esta técnica es importante que la malta este seca para evitar que se peguen las partículas a los rodillos y además se necesita un tamaño de grano uniforme para conseguir una molienda eficaz.

- Molido en húmedo:

A esta técnica se le conoce con el nombre de “Wet Milling”, consiste en rociar con agua los granos antes de molerlos para que la cáscara se hidrate y se vuelva más flexible y de esta forma sea más resistente a la trituración.

Por lo tanto, con este proceso obtenemos una harina o sémola (en el caso del molino húmeda esta estará húmeda y por lo tanto tendrá forma de pasta, mientras que en el otro caso estará seca) y el desprendimiento de la cáscara de la malta. La malta pasa por un tamizado para seleccionar las partículas útiles, y la harina que pasa a través del tamiz es dirigida a la olla de cereales. El arroz triturado pasa directamente a la olla de crudos.

Realizando esta molienda obtenemos distintos tamaños de partículas y en distintas cantidades. El tamaño de las partículas dependerá del grano inicial y además sabiendo esto se regulan los rodillos para obtener una molienda donde la extracción de los azúcares sea lo más eficiente posible. Se hace pasar por 5 tamices con distintos tamaños de agujero de la malla y de esta forma obtenemos los porcentajes de cada tamaño de partícula como se observa en la Tabla 33.

ELEMENTO	TAMAÑO TAMIZ (mm)	PORCENTAJE
Cáscara	1.27	30%
Molienda gruesa	1.01	10 – 20%
Molienda fina I	0.547	20 – 30%
Molienda fina II	0.253	
Harina	0.152	20 – 30%
Harina fina	-	

Tabla 33. Partículas obtenidas en la molienda (Datos obtenidos de: [30])

Este proceso dura aproximadamente 1 hora por lote, aunque depende de la cantidad de malta que necesite el tipo de cerveza elaborada.

## 2) *MACERACIÓN:*

Es el proceso donde se convierten los almidones de los granos en azúcar dando lugar a un líquido azucarado mediante la acción del agua, el calor y las enzimas.

Del proceso anterior hemos obtenido harina de malta y la dividimos en dos porciones, primero introducimos los adjuntos (el arroz) con una porción de harina de malta del 8 – 15% y se calienta con agua hasta obtener una mezcla uniforme en la olla de crudos, por otro lado, la parte restante de harina de malta se introduce en la olla de mezcla donde se le añade agua y se prepara para mezclarse con el contenido de la olla de crudos.

Una vez se tiene una mezcla homogeneizada se procede a realizar un aumento de la temperatura a una velocidad apropiada con adecuados períodos de estabilización que hace que las enzimas tengan condiciones favorables para transformar el almidón en azúcares fermentables y las proteínas en péptidos y aminoácidos que serán la fuente nitrogenada necesaria para la fermentación superior.

Una enzima es una proteína catalizadora (catalizador biológico) que tiene la función de acelerar una reacción energéticamente posible, logrando acortar un proceso que se produciría, de todos modos, sin su presencia pero muchísimo más lento.

El proceso se realiza en los sistemas de maceración que pueden ser clasificados ya sea como sistemas de infusión o sistemas de decocción o una combinación de ambos dependiendo del tipo de cerveza, de las materias primas elegidas, de la sala de cocción y de las condiciones económicas:

- Maceración por infusión:

Consiste en el calentamiento directo del macerado hasta alcanzar la temperatura máxima, que es la de sacarificación.

Se va proporcionando calor progresivamente a la mezcla en agitación, hasta alcanzar las temperaturas seleccionadas de un modo escalonado. Es decir, cuando se alcanza cada uno de los niveles de temperatura programados se realiza un estacionamiento temporal o reposo térmico para que las enzimas completen la actividad hidrolítica.

Este tipo de maceración se puede aplicar para elaborar cualquier tipo de cerveza y se lleva a cabo en una sola cuba. Aunque requiere el empleo de maltas bien desagregadas con elevado potencial enzimático.

El coste energético de la maceración por infusión es menor que en los métodos por decocción.

- Maceración por decocción:

Se extrae un volumen parcial del macerado (al que se denomina temple) de la caldera principal y se lleva a otra caldera (de los templos), donde se lleva a ebullición. Cuando el temple se devuelve la caldera principal, se eleva indirectamente la temperatura del macerado total. Esta operación se puede realizar 1,2 o 3 veces.

Se puede observar que con este método se necesita más tiempo pero tiene un mayor rendimiento de la materia prima en el proceso industrial.

Sabiendo todo esto, si deseamos cervezas, más alcohólicas y secas, debemos de macerar entre 60 y 65°C. O para cervezas de menor contenido de alcohol, más dulces y de mayor cuerpo, debemos usar temperaturas entre 68.5 y 70°C [32]. Además, podemos concluir que el proceso de maceración dura entre 60 y 90 minutos [3].

Como se observa tanto la temperatura como el pH son factores importantes para el accionamiento de las enzimas. Para controlar o ajustar el pH se puede usar ácidos grasos alimenticios o soluciones ácidas naturales.

En esta fase también se pueden añadir adjuntos, como hemos mencionado anteriormente, previamente acondicionados, a fin de aumentar el porcentaje de almidón.

3) *FILTRACIÓN DEL MOSTO:*

En este proceso se separan los sólidos o bagazo presente en el líquido azucarado que se ha obtenido en el proceso anterior, y para ellos se usa una cuba filtro o en el filtro prensa y se obtiene lo que se denomina mosto.

El proceso consiste en que el líquido azucarado se le hace pasar por un filtro prensa y aquí ocurren dos etapas que se suceden de forma separada, una tras otra:

- Etapa 1: Filtración del primer mosto.

La primera etapa consiste en obtener un mosto de alto contenido en azúcares y se le llama primer mosto. El primer mosto deberá tener un contenido en extracto del 4 al 6% mayor que la cerveza a fabricar, puesto que, el lavado para la extracción diluye cada vez más el mosto.

Esta operación tarda aproximadamente unos 45 minutos.

- Etapa 2: lavado del bagazo o sparging.

La segunda etapa consiste en lavar el afrecho (cáscara del grano) con agua caliente a través del lecho filtrante y a este mosto se le llama segundo mosto. Para lavar el afrecho necesitamos agua desalcalinizada porque las sustancias amargas de la cáscara de la malta se disuelven fácilmente en agua alcalina y además como máximo puede estar a 75°C para que el almidón presente en el afrecho no se disuelva ya que esto causaría problemas de turbiedad y fermentación.

El proceso completo de filtración tardará entre 2 y 3 horas.

La mayor parte del afrecho es direccionado al secador para venderlo como alimento para animales.

#### 4) COCCIÓN:

Agregamos al mosto filtrado el lúpulo y se lleva la mezcla a ebullición en la caldera de cocción o caldera de ebullición entre media y dos horas para obtener un mosto cocinado o lupulado.

En esta etapa se destruyen los microorganismos, se desactivan las enzimas, se extraen las sustancias amargas del lúpulo que le da el sabor clásico a la cerveza y su olor característico, y además se elimina el exceso de agua para conseguir la densidad adecuada del mosto, se esteriliza el mosto y se precipitan los complejos de proteínas.

Tenemos tres tipos de cocción: cocción atmosférica, cocción a baja presión (0.5 kg/cm<sup>2</sup>) y cocción a alta presión (3 kg/cm<sup>2</sup>) [4]

- Cocción atmosférica:

Este tipo de cocción se usa en España. Consiste en calderas abiertas por su parte superior que utilizan como medio de agitación la circulación por termosifón. En las calderas de este tipo, el mosto hierva con el lúpulo durante hora y media a dos horas, con una tasa de evaporación del 6 – 8%/H, representa un consumo de energía relativamente elevado.

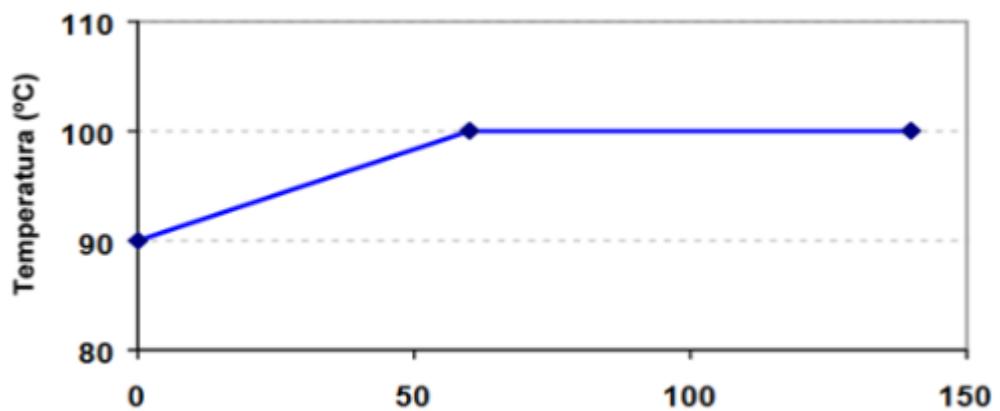


Gráfico 10. Gráfica temperatura – tiempo cocción atmosférica (Datos obtenidos de: [4])

Un sistema mixto y energéticamente más eficaz consta de un calentador separado por el que circula el mosto dulce. La temperatura de trabajo es mayor, 106 – 110°C, lo que con lleva una mejor utilización del lúpulo (un 15%) y un menor tiempo de cocción (de 30 a 90 minutos). La agitación la proporciona la circulación a través del calentador externo y se evita la evaporación excesiva.

- Cocción a baja presión:

En este sistema el mosto dulce se calienta a presión atmosférica hasta el punto de ebullición mediante un intercambiador externo, posteriormente se presuriza la instalación aumentando la temperatura del mosto hasta los 105 – 112°C durante 10 – 15 minutos y por último se despresuriza el sistema reduciéndose la temperatura del mosto como se observa en el siguiente diagrama:

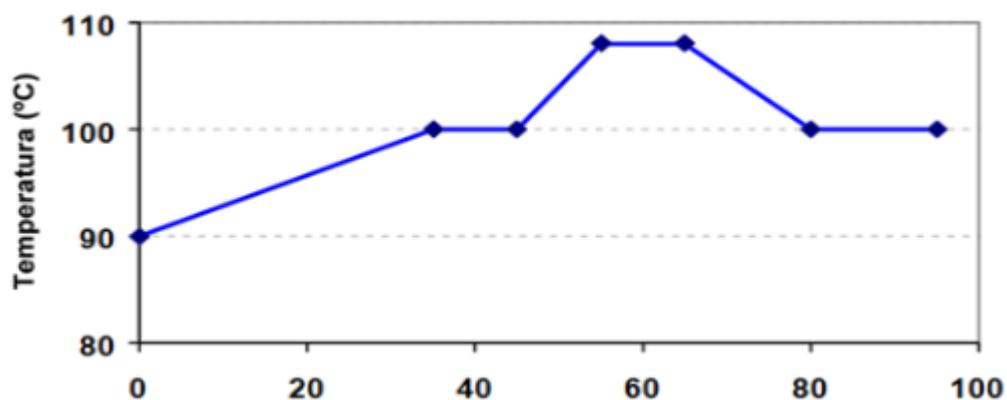


Gráfico 11. Gráfica temperatura – tiempo cocción a baja presión (Datos obtenido de [4])

El sistema se completa generalmente con la instalación de intercambiadores de calor que permiten recuperar el calor de los vapores de ebullición para precalentar el agua que calentará el mosto a la entrada del sistema desde aproximadamente 80°C hasta 96°C.

Independientemente del sistema de cocción empleado, el agua utilizada para refrigerar el mosto a la salida de su clarificación se utiliza para precalentar el mosto antes de la cocción, con lo que se consigue un importante ahorro energético.

El sistema a baja presión permite conseguir unos ahorros en vapor del 38% frente a los sistemas atmosféricos.

Los sistemas de cocción a baja presión son más eficientes energéticamente que los atmosféricos, sin que ello repercuta en la calidad del mosto y permiten la recuperación de los vapores de cocción, aprovechando su calor para incrementar la temperatura del mosto de entrada.

Por lo tanto, como se ha nombrado anteriormente, la cocción se realiza en tanques o depósitos de cocción. Este proceso es el que consume la mayor cantidad de energía en todo el proceso de fabricación del mosto. Se estima un rendimiento de la energía del 80% en la sala de cocción.

Cuando ingresa el mosto en el tanque de cocción la temperatura de este es de 78ºC aproximadamente, y para calentarla hasta los 100ºC se requieren aproximadamente 3 kWh/hl, lo que equivale a 10.5 MJ

Si se hierve el mosto durante 90 minutos a 100ºC, alcanzando con ello una evaporación total del 12%, se requiere aproximadamente 14 kWh por cada hl de mosto caliente [3].

#### 5) *CLARIFICACIÓN:*

Como se ha nombrado en el proceso anterior, durante la cocción, las proteínas sensibles al calor precipitan y se forma el “trub” que es necesario eliminar de la cerveza. Por eso, el mosto cocinado es dejado en reposo en el tanque de sedimentación para que las sustancias que se hayan formado en el proceso de cocción se aglutinen en el fondo y se retenga el precipitado proteínico, consiguiendo la clarificación del mosto. Para favorecer que las sustancias se depositen en el fondo se usan depósitos conocidos como Whirlpool y se aplica un tipo especial de centrifugación.

El Whirlpool es un recipiente cilíndrico en el cual el mosto es introducido tangencialmente por bombeo, de este modo se produce un flujo rotatorio en el recipiente que causa que el trub caliente sediente formando un cono en el centro del recipiente. Este proceso conocido como centrifugación, tardará 45 minutos aproximadamente. El trasiego durará 30 minutos pero en ese momento deben esperarse otros 15 minutos para que las partículas que sigan en suspensión decanten poco a poco. Por lo tanto, el proceso dura aproximadamente 90 minutos.

Una vez transcurrido el tiempo de decantación se comenzará a drenar el mosto del tanque con la bomba hacia el intercambiador de calor. Es importante no arrastrar sólidos junto al mosto. Los primeros dos litros que salen del Whirlpool deben ser desechados ya que probablemente estén turbios.

#### 6) *ENFRIMIENTO DEL MOSTO:*

Una vez clarificado el mosto y libre de material en suspensión, se procede a bombear el líquido clarificado, que se encuentra a 98ºC aproximadamente, al tanque de fermentación pasando primero por un intercambiador de calor hasta bajar la temperatura del líquido hasta los 10ºC, y se añade aire estéril mediante un sistema de inyección para agregar oxígeno al mosto (se le inyecta aire hasta conseguir una concentración de aproximadamente 8 ppm de O<sub>2</sub>).

Es decir, el mosto que sale por el lateral del Whirlpool debe ser enfriado desde los 98ºC a los 10ºC en menos de 45 minutos. Para ello se usa un intercambiador de calor de dos fases, en la primera fase circula agua de red a unos 8 – 20ºC y permite enfriar el mosto hasta 25 – 35ºC, y en la segunda fase se usa agua a unos 0ºC para que el mosto alcance la temperatura óptima de fermentación.

El agua empleada por el intercambiador saldrá de este a unos 60ºC y se almacenará en algún depósito para su uso posterior en la limpieza y desinfección de equipos.

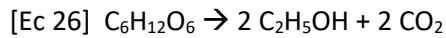
#### 4. FERMENTACIÓN:

Una vez enfriado el mosto cocinado, se añaden las levaduras para la multiplicación celular y se deja reposar la mezcla en un tanque a 12°C (entre 10.5 – 15°C según el tipo de cerveza [33]) durante 7 días [31], permitiendo que el metabolismo de las levaduras cambie la respiración aerobia inicial a la fase de respiración anaerobia en donde los azúcares del mosto (glucosa) se transforman en alcohol (etanol) y gas carbónico (dióxido de carbono). Es decir, el mosto frío se introduce en depósitos donde se le añaden las levaduras, previamente separadas, que crecen hasta agotar el oxígeno y fermentar los azúcares transformándolos en alcohol y anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) y obtener lo que se denomina cerveza no madura.

Es decir, la levadura necesita energía y nutrientes para la realización de sus procesos metabólicos vitales y la formación de nuevas sustancias celulares. La energía para la realización de estos procesos es obtenida por la levadura preferentemente por respiración. La obtención de energía es muy grande con la respiración, dado que la glucosa es descompuesta a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, sin que queden residuos, de la siguiente manera:



Ante la ausencia de aire, la levadura pasa a la fermentación alcohólica, como único ser viviente capaz de ello. Se forma aquí alcohol (etanol) y CO<sub>2</sub>, a partir de la glucosa:



$$\Delta G = -230 \text{ kJ}$$

De esta reacción podemos decir que con 1 mol de glucosa se obtienen 180 gramos durante la fermentación alcohólica de los cuales 92 gramos son de alcohol y 88 gramos son de CO<sub>2</sub>. Por lo que podemos decir, que la porción volumétrica del CO<sub>2</sub> es incomparablemente más grande que la del alcohol dado que los gases tienen una densidad substancialmente mayor.

El alcohol que se forma aquí contiene aún mucha energía, por lo que se obtiene mucha más energía por respiración que por fermentación.

La degradación (catabolismo) de la glucosa hasta alcohol, o en caso de la respiración, hasta CO<sub>2</sub> y agua tiene lugar en numerosas etapas de reacción. Cada reacción es catalizada por una enzima especial. Estas enzimas están unidas en la célula de levadura a determinadas estructuras celulares.

El gas carbónico y la levadura formada en exceso en este proceso pueden ser extraídos y reutilizados en otros procesos. El gas carbónico es enviado a la planta de tratamiento de gas y la lavadura al secador.

## 5. MADURACIÓN:

La cerveza producida es transferida a los tanques de maduración para reposo de 20 – 28 días, con temperaturas cerca de los 0°C, logrando una estabilidad química y un enfriamiento del sabor. La finalidad del reposo es la decantación de las levaduras aun presentes en la cerveza [31]

En estos depósitos tiene lugar la fermentación secundaria con la levadura arrastrada, periodo en el que la cerveza adquiere el sabor y aroma típicos, decantando todavía más y precipitando sustancias que, de otro modo, enturbiarían la cerveza cuando fuera servida al consumidor.

Los restos de levadura de los fondos de los tanques de fermentación y maduración contienen entre 10 – 15% de los sólidos totales y entre 1.2 – 2.5% del total de cerveza producida [33]

## 6. FILTRACIÓN:

Este proceso consiste en retirar las levaduras por un sistema capilar que retenga la mayor cantidad de materias insolubles aun en suspensión como levaduras y proteínas presentes en la cerveza para que consiga el brillo y transparencia característica.

Antes de la filtración en algunos casos se realiza una centrifugación para eliminar la levadura restante y los precipitados. Esta operación se realiza o no dependiendo del tipo de lúpulo añadido y la levadura empleada.

El proceso de filtración se realiza mediante velas utilizando tierra diatomácea o el filtrado de membrana, proceso que permite ahorrar energía en 10.000 MJ por hectolitro producido.

El abrillantado puede realizarse mediante placas filtrantes que están constituidas por fibras de celulosa. Cuanto más finas sean éstas tanto menores serán los poros de la placa filtrante correspondiente, aumentando así su capacidad de retención de partículas de pequeño diámetro. En algunos casos se usan plazas en serie de diámetro de poro decreciente para retener primero las partículas más groseras y acabar reteniendo las más pequeñas. Cuando se utilizan placas de diámetro muy pequeño es posible incluso retener baterías, lo que se conoce como filtración esterilizante.

La cerveza filtrada es enviada a tanques de gobierno o BBTs para ser analizada por los sistemas de control de calidad. Durante este proceso se ajusta:

- El contenido de CO<sub>2</sub> (inyección del CO<sub>2</sub> recuperado del proceso anterior)
- La concentración de la cerveza (dilución con agua cervecería des – oxigenada)
- Estabilidad coloidal (tratamiento con sílicas o PVPP para darle la adecuada vida)

Si la cerveza no tuviera suficiente carbónico se le inyecta en este momento.

Si la cerveza pasa el control de calidad, una vez filtrada es enviada a un pasteurizador flash para conservar la cerveza hasta el consumo. La pasteurización consiste en calentar la cerveza de 72 – 85°C por un intervalo de 15 – 40 segundos previo al envasado. Actualmente existen tecnologías de membrana que permiten realizar esta operación sin necesidad de aplicar calor.

La cerveza se puede estabilizar antes o después de envasada dependiendo del tipo de envase que se vaya a utilizar.

- En la estabilización microbiológica antes del envasado los barriles debido a su volumen no pueden presurizarse llenos, por lo que la cerveza se pasteriza antes del llenado. Dicha pasterización se lleva a cabo en intercambiadores de calor de placas o sistemas de microfiltración.
- En la pasterización después del envasado las botellas o latas llenas se introducen en una pasterizadora en la que se someten a duchas o baños de agua a distintas temperaturas, primero crecientes hasta que la cerveza alcance la temperatura de pasterización, y luego decrecientes para enfriar las botellas que salen del pasterizador.

## 7. PREPARACIÓN DE ENVASES

Una vez la cerveza cumple con todos los parámetros establecidos, es enviada a las líneas de escape de envase para que el producto sea embotellado, enlatado, embarrillado o colocado en auto – tanques. Tenemos distintas formas de preparar el envase dependiendo del tipo de envase como se muestra a continuación:

- **Botellas retornables:**  
Las botellas sucias se limpian en lavadores constituidos por una serie de baños y duchos a presión con sosa, detergente y agua.
- **Botellas no retornables:**  
La lavadora – llenadora consta de una serie de módulos idénticos en los que el barril se despresuriza, se lava internamente con agua caliente y detergente, se escurre, se enjuaga con agua fría, se esteriliza con vapor, se presuriza con CO<sub>2</sub> y se llena.
- **Latas:**  
La preparación de las latas antes del llenado es similar a la de las botellas no retornables. Las latas se enjuagan con agua a presión antes del llenado.

## 8. ENVASADO:

El envasado puede ser en botellas, retornables o de un solo uso, en latas o en barriles. Las líneas de envasado son distintas según el tipo de envase.

- **Botellas retornables:**  
En el caso de las botellas retornables, las líneas suelen constar de despaletizadora, desempacadora, lavadora de botellas, inspector electrónico, llenadora taponadora, pasterizadora, etiquetadora, empacadora y paletizadora.
- **Botellas no retornables:**  
La línea de envasado de botellas no retornables consta normalmente de una desempacadora de vidriera, una enjuagadora de botellas, un inspector electrónico, una llenadora taponadora, un pasterizador, una etiquetadora, empacadora y paletizadora.
- **Latas:**

Antes del envasado en latas la cerveza se pasteriza y enfriá a 0°C. La admisión de latas vacías se hace por una cadena al carrusel de la llenadora y el llenado comienza automáticamente una vez que se iguala la presión entre la lata y el anillo de cierre. El llenado se realiza sin turbulencias hasta la altura prefijada.

- **Bariles:**

La línea de llenado de barriles consta de una apretadora de espadín, un lavador exterior, un pasterizadora, una lavadora – llenadora, una pesadora, una volteadora, una etiquetadora, un inspector de bocas y una paletizadora. El llenado se realiza sin apenas formación de espuma.

En el momento de envasado, las botellas deben estar a una temperatura entre 12 – 15°C.

Las botellas con la cerveza pasan por un filtro de calidad antes de ser etiquetadas y el proceso culmina con el producto envasado que regresa a los pallets para su posterior agrupación según las distintas presentaciones para la venta y almacenamiento.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. X. Turc Castellà, "Diseño de una planta para la fabricación de cerveza artesanal," *Esc. Super. Técnica Inegneiría Ind. Barcelona*, 2018, [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/120435>.
- [2] C. Canales, *Ministerio de Medio Ambiente* .
- [3] Rubén Sancho Saurina, "Memoria " DISEÑO DE UNA MICRO-PLANTA DE FABRICACIÓN DE CERVEZA Y ESTUDIO DE TÉCNICAS Y PROCESOS DE PRODUCCIÓN "," *Univ. Poltècnica Catalunya*, p. 121, 2015, [Online]. Available: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76575/02\\_Memoria.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/76575/02_Memoria.pdf?sequence=5&isAllowed=y).
- [4] A. Loizaga, B. Tutor, F. Javier, and P. Lucena, "Análisis Térmico de Procesos Industriales para uso de Energía Solar Térmica," 2017.
- [5] M. Bailera, P. Lisbona, and L. M. Romeo, "Power to gas-oxyfuel boiler hybrid systems," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 32, pp. 10168–10175, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.074.
- [6] R. Chauvy, L. Dubois, P. Lybaert, D. Thomas, and G. De Weireld, "Production of synthetic natural gas from industrial carbon dioxide," *Appl. Energy*, vol. 260, no. July 2019, p. 114249, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114249.
- [7] M. Bailera, P. Lisbona, L. M. Romeo, and S. Espatolero, "crossmark," vol. 69, no. January 2016, pp. 292–312, 2017.
- [8] M. Calvo Díaz, "Almacenar electricidad produciendo gas natural: Power to Gas El almacenamiento de la electricidad."
- [9] E. Flores, G. Tutor, F. Javier, and P. Lucena, "Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales Estado del arte de electrolizadores de óxido sólido," 2020.
- [10] M. Del, C. C. Jul, M. S. Delgado, and L. Rodríguez, "Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno... |19 ARTÍCULO Modelado de sistemas de electrolisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables Modelling of alkaline electrolysis systems for hydrogen production by renewable energies," 2018.
- [11] U. de Pino Pliego, Antonio. Sevilla, "Electrolizadores," pp. 26–35, 2009, [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproj/30127/fichero/Capítulo+3+-+Electrolizadores.pdf>.
- [12] "Electrólisis de membrana de electrolito de polímero - Polymer electrolyte membrane electrolysis - qaz.wiki." [https://es.qaz.wiki/wiki/Polymer\\_electrolyte\\_membrane\\_electrolysis](https://es.qaz.wiki/wiki/Polymer_electrolyte_membrane_electrolysis) (accessed Mar. 18, 2021).
- [13] S. G. Arranz, "Power to gas y metanación subterránea," 2020.
- [14] "Características placas solares," pp. 45–46.
- [15] "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission." [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/tools.html](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/tools.html) (accessed Mar. 18, 2021).
- [16] PVGIS, "Datos Mensuales de Irradiación," pp. 5–6, 2015, [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>.
- [17] "Cálculo Placas Solares, Conexiones y Producción Fotovoltaica." <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/> (accessed Apr. 19, 2021).

- [18] “Hora Solar Pico (HSP) | Eficiencia Energética.” <https://certificacionenergetica.info/hora-solar-pico-hsp/> (accessed Apr. 19, 2021).
- [19] IDAE, “Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura.,” *Sol. Collect. Energy Storage, Mater.*, vol. 53, no. 9, pp. 61–78, 2009, [Online]. Available: [http://www.seas.upenn.edu/~lior/lior\\_papers/Thermal Theory and Modeling of Solar Collectors.pdf](http://www.seas.upenn.edu/~lior/lior_papers/Thermal%20Theory%20and%20Modeling%20of%20Solar%20Collectors.pdf).
- [20] “Instalar placas solares: Precios, Pasos de la instalación y Permisos.” <https://selectra.es/autoconsumo/info/instalacion> (accessed May 10, 2021).
- [21] J. Proost, “State-of-the art CAPEX data for water electrolyzers, and their impact on renewable hydrogen price settings,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 9, pp. 4406–4413, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.07.164.
- [22] M. Bailera *et al.*, “Smart Island : Tecnología Power-to-Gas para una isla de Gran Canaria 100 % renovable,” pp. 1–16.
- [23] “Captura y almacenamiento de CO2: 3. ¿Cómo puede capturarse el CO2?” <https://www.greenfacts.org/es/captura-almacenamiento-co2/l-2/3-captura-co2.htm> (accessed May 10, 2021).
- [24] C. Y. Almacenamiento De Co, B. Navarrete, R. Candil Ester Vilanova, J. Segarra Colegio, and M. Alicia Arenillas, “GT-02-CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO2.”
- [25] “Precio del kWh 2021: ¿Cuál es el precio de la luz en España hoy?” <https://companiadeluz.es/info/tarifas/precio-kwh> (accessed May 10, 2021).
- [26] “¿Cuál es el precio del kWh de Gas natural hoy?” <https://tarifaluzhora.es/info/precio-kwh-gas-natural> (accessed May 10, 2021).
- [27] “Mayores costes en emisiones de CO2 no ayudan al ambiente ni a la gente.” <https://www.cambio16.com/aumento-de-costes-en-emisiones-de-co2-no-ayuda-ni-al-ambiente-ni-a-la-gente/> (accessed May 10, 2021).
- [28] “El comercio de derechos de emisión.” <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/que-es-el-comercio-de-derechos-de-emision/> (accessed May 10, 2021).
- [29] “Así funciona el mercado de derechos de emisiones de CO2 | Capital Radio.” [https://www.capitalradio.es/noticias/economia/asi-funciona-el-mercado-de-derechos-de-emisiones-de-co2\\_47499385.html](https://www.capitalradio.es/noticias/economia/asi-funciona-el-mercado-de-derechos-de-emisiones-de-co2_47499385.html) (accessed May 10, 2021).
- [30] G. E. Arana Contreras, “Proceso productivo de la elaboración de cerveza lager a nivel industrial,” p. 96, 2016.
- [31] M. F. Chang, “Análisis De Ciclo De Vida De La Producción Industrial De Una Cerveza De Tipo Lager Envasada En Botella De 330 Centímetros Cúbicos En La Ciudad De Guayaquil,” *J. Chem. Inf. Model.*, p. 105, 2017.
- [32] “Las Temperaturas de Maceración, Ciencia y Arte. – BrewMasters. Insumos e Ingredientes para Elaborar Cerveza.” <https://brewmasters.com.mx/las-temperaturas-de-maceracion-ciencia-y-arte/> (accessed Mar. 17, 2021).
- [33] AINIA, “Mejores técnicas disponibles en el sector cervecero,” p. 119, 2002.