

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

Ingeniería básica de una planta de producción de cerveza artesanal sin gluten

Autora: Rocío Salado Hidalgo

Tutores: Mónica Rodríguez Galán

J. Fernando Vidal Barrero

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

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería Química

Ingeniería básica de una planta de producción de cerveza artesanal sin gluten

Autora:
Rocío Salado Hidalgo

Tutores:
Mónica Rodríguez Galán
J. Fernando Vidal Barrero

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2025

Trabajo Fin de Grado: Ingeniería básica de una planta de producción de cerveza artesanal sin gluten

Autor: Rocío Salado Hidalgo

Tutor: Mónica Rodríguez Galán
J. Fernando Vidal Barrero

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, mi gratitud profunda a mis tutores, cuya orientación y conocimientos han sido fundamentales para guiarme en este proceso. Su apoyo constante ha sido una fuente de motivación y aprendizaje invaluable.

También deseo agradecer a Guadalquibeer por abrirme las puertas de su fábrica y permitirme descubrir la pasión y el oficio detrás de cada cerveza. La experiencia y enseñanzas compartidas han enriquecido enormemente este trabajo.

Finalmente, a quienes, con sus palabras, apoyo silencioso y gestos sencillos, me han impulsado a perseverar cuando el cansancio amenazaba con frenar mis pasos. Su confianza y compañía han sido el motor que me ha permitido llegar hasta aquí.

Rocío Salado Hidalgo

Sevilla, 2025

Resumen

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el desarrollo de una ingeniería básica para una planta de producción de cerveza sin gluten con una capacidad anual de 75.000 litros. La planta está diseñada para cubrir las demandas de un mercado creciente, ofreciendo un producto de alta calidad que satisface las necesidades de consumidores con intolerancia al gluten o preferencias por bebidas libres de esta proteína.

El trabajo se centra en el diseño técnico de las etapas principales del proceso cervecero, abarcando desde la molienda de la malta hasta el almacenamiento en frío del producto terminado. En concreto, se desarrollan las fases de macerado, filtración del mosto, cocción, enfriamiento, fermentación, maduración, filtración final y almacenamiento, quedando fuera del alcance técnico del proyecto las operaciones previas de acondicionamiento de materias primas y las posteriores de envasado, que se describen únicamente de forma general.

Durante el desarrollo del trabajo, se detallan los criterios técnicos y cálculos aplicados para dimensionar los equipos y sistemas involucrados en la elaboración, basándose en referencias bibliográficas y datos experimentales. Asimismo, se realiza un análisis económico preliminar para estimar la inversión inicial y los costes operativos, con el fin de evaluar la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

Abstract

The objective of this project is to develop a basic engineering design for a gluten-free beer production plant with an annual capacity of 75.000 liters. The plant is designed to meet the demands of a growing market by offering a high-quality product tailored to consumers with gluten intolerance or those who prefer beverages free from this protein.

The project focuses on the technical design of the main stages of the brewing process, covering everything from malt milling to the cold storage of the finished product. Specifically, it includes the stages of mashing, wort filtration, boiling, cooling, fermentation, maturation, final filtration, and storage. Operations such as raw material conditioning and packaging are outside the technical scope of the project and are described only in general terms.

Throughout the development of the project, the technical criteria and calculations applied to size the equipment and systems involved in production are detailed, based on bibliographic references and experimental data. In addition, a preliminary economic analysis is carried out to estimate the initial investment and operating costs, in order to assess the feasibility and profitability of the project.

Índice

Agradecimientos.....	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice.....	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Objetivos y alcance	21
2 Introducción.....	22
2.1 Antecedentes.....	22
2.2 Enfoque artesanal	23
2.3 Conceptos básicos sobre el gluten y la celiaquía.....	24
2.3.1 Definición de gluten y su impacto en la salud	24
2.3.2 La celiaquía y la intolerancia al gluten.....	24
2.4 Fundamentos de la elaboración de cerveza.....	25
2.4.1 Historia y evolución de la cerveza.....	25
2.4.2 Proceso tradicional de producción de cerveza	27
2.5 Cerveza sin gluten: Definición y características	28
2.5.1 Valor nutritivo de la cerveza	28
2.5.2 Materias primas empleadas	28
2.5.3 Tecnología y adaptaciones del proceso para cerveza sin gluten	32
2.5.4 Normativa aplicable a la actividad.....	33
3 Estudio de mercado	37
3.1 Panorama general del mercado de cerveza artesanal en España	37
3.2 Situación del mercado de cerveza sin gluten.....	37
3.3 Análisis regional: Sevilla como motor del auge cervecero artesanal en el sur de España.....	38
3.3.1 Posición de Sevilla en el consumo y ventas de cerveza.....	38
3.3.2 Actores locales, competencia y perspectiva nacional.....	39
3.1 Análisis FODA del mercado de cerveza artesanal sin gluten.....	41
4 Memoria descriptiva	42
4.1 Etapas del proceso de fabricación	42
4.1.1 Malteado de la cebada	42
4.1.2 Elaboración del mosto	44
4.1.3 Fermentación y maduración.....	48
4.1.4 Filtración.....	49
4.1.5 Carbonatación, estabilización y envasado	50
4.2 Diagrama de bloques.....	52

4.3	<i>Maquinaria</i>	52
4.3.1	Molino de rodillos	53
4.3.2	Macerador	53
4.3.3	Filtro prensa	54
4.3.4	Hervidor con sistema Whirlpool.....	55
4.3.5	Intercambiador de calor de placas.....	56
4.3.6	Tanque cilíndrico cónico.....	57
4.3.7	Tanque de dosificación de tierras diatomeas	58
4.4	<i>Diagrama de flujo de procesos (PFD)</i>	59
5	Memoria de cálculo	60
5.1	<i>Justificación de la producción de la planta</i>	60
5.1.1	Estimación de la demanda de cerveza sin gluten en Sevilla.....	60
5.1.2	Dimensionamiento de la capacidad productiva.....	61
5.1.3	Clasificación de la cervecería según su producción	61
5.2	<i>Balance de materia</i>	62
5.2.1	Introducción.....	62
5.2.2	Cálculos para el balance de materia.....	62
5.3	<i>Balance de energía</i>	70
5.3.1	Introducción.....	70
5.3.2	Diagrama cronológico de operaciones térmicas.....	70
5.3.3	Cálculos para el balance de energía	71
5.4	<i>Dimensionado de los equipos principales</i>	77
5.4.1	Molino	77
5.4.2	Recipiente de maceración	77
5.4.3	Hervidor con sistema Whirlpool	79
5.4.4	Intercambiador de placas.....	81
5.4.5	Fermentadores	82
5.4.6	Tolva de recepción de malta.....	83
5.4.7	Tanques de almacenamiento de cerveza.....	84
5.4.8	Tanque de dosificación de tierras diatomeas (+ filtro).....	86
5.4.9	Filtro prensa	87
5.4.10	Caldera.....	87
5.4.11	Sistema de refrigeración.....	88
6	Análisis económico del Proyecto	91
6.1	<i>Costes de equipos, materias primas y servicios auxiliares</i>	91
6.1.1	Costes de equipos principales.....	91
6.1.2	Costes de servicios auxiliares	91
6.1.3	Costes de materias primas	92
6.2	<i>Coste total de inversión de la planta</i>	92
6.3	<i>Coste total de producción de la planta</i>	93
6.4	<i>Índices de rentabilidad</i>	94
6.4.1	Flujos de caja.....	94
6.4.2	Valor actual neto (VAN)	96
6.4.3	Tasa interna de rentabilidad (TIR).....	96
6.4.4	Payback (PB).....	96
Anexo		97
	<i>ANEXO I. PFD</i>	97
	<i>ANEXO II. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA</i>	98
	<i>ANEXO III. CATÁLOGOS</i>	100
Referencias		101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Comparativa cerveza artesanal-industrial	23
Tabla 2-2. Composición de la cebada [3]	29
Tabla 2-3. Composición media del lúpulo seco [3]	30
Tabla 2-4. Composición del agua para la fabricación de cerveza	31
Tabla 3-1. Marcas de cervezas artesanales sevillanas [33]	39
Tabla 3-2. Análisis FODA	41
Tabla 4-1. Composición del bagazo seco.	47
Tabla 4-2. Resumen de las etapas con datos principales	51
Tabla 5-1. Resumen del dimensionamiento	61
Tabla 5-2. Tipos de cervecera y producción anual	62
Tabla 5-3. Cantidad de materias primas	63
Tabla 5-4. Relación °Brix, densidad y kg de sólido por litro de agua	64
Tabla 5-5. Cálculo de la densidad de la cerveza (ρ_{28})	66
Tabla 5-6. Datos de partida para el balance de materia	66
Tabla 5-7. Residuos principales	67
Tabla 5-8. Resultados del balance de materia	70
Tabla 5-9. Datos de partida para el balance de energía	73
Tabla 5-10. Resultados del balance de energía	76
Tabla 5-11. Datos molino de malta	77
Tabla 5-12. Datos del recipiente de macerado	79
Tabla 5-13. Datos de la paila de hervor Whirlpool	81
Tabla 5-14. Datos del intercambiador de placas	82
Tabla 5-15. Datos de los fermentadores	83
Tabla 5-16. Datos de la tolva de malta	84
Tabla 5-17. Datos de tanque de almacenamiento de cerveza	85
Tabla 5-18. Datos del tanque de tierras diatomeas	86
Tabla 5-19. Datos del filtro prensa	87
Tabla 5-20. Datos de la caldera de biomasa	88

Tabla 5-21. Datos del equipo de refrigeración	89
Tabla 5-22. Datos del depósito de agua glicolada	89
Tabla 5-23. Resumen de los principales equipos del proceso	90
Tabla 6-1. Equipos y costes unitarios	91
Tabla 6-2. Coste y cantidad consumida por cada ítem de la planta	91
Tabla 6-3. Costes de materias primas por kg consumido	92
Tabla 6-4. Cálculo del coste total de inversión	93
Tabla 6-5. Cálculo del coste total de producción	93
Tabla 6-6. Cálculo de los flujos de caja (FNC)	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Logotipo de los principales grupos cerveceros	22
Figura 2-2. Intestino con enfermedad celiaca	24
Figura 2-3. Documento sumerio escrito sobre piedra	26
Figura 2-4. Proceso tradicional de producción de cerveza	27
Figura 2-5. Cebada cervecera de dos carreras	29
Figura 2-6. Morfología de los conos de lúpulo y las glándulas de lupulina	30
Figura 2-7. Posiciones de levadura en la fermentación	32
Figura 2-8. Logo "Controlado por FACE"	35
Figura 2-9. Símbolo ELS	35
Figura 3-1. Ventas globales por zonas geográficas	39
Figura 3-2. Fábricas en España	40
Figura 3-3. Repartición a lo largo del territorio de las 420 cerveceras activas, divididas en comunidades autónomas	40
Figura 4-1. Tipos de malta	44
Figura 4-2. Actividad enzimática en un macerado de una hora	46
Figura 4-3. Comparación de procesos de filtración y rangos de tamaño de partículas que retienen	49
Figura 4-4. Diagrama de bloques del proceso	52
Figura 4-5. Molino de rodillos	53
Figura 4-6. Recipiente de maceración	54
Figura 4-7. Filtro prensa	55
Figura 4-8. Hervidor con sistema Whirlpool	56
Figura 4-9. Intercambiador de placas	57
Figura 4-10. Esquema del intercambiador de placas	57
Figura 4-11. Tanque cilíndrico cónico	58
Figura 4-12. Tanque de dosificación de tierras diatomeas y filtro de placas	59
Figura 5-1. Diagrama para calcular ρ_{13} .	65

Figura 5-2. Diagrama de flujo (molienda)	68
Figura 5-3. Diagrama de flujo (macerado)	68
Figura 5-4. Diagrama de flujo (cocción)	69
Figura 5-5. Diagrama de flujo (fermentación)	69
Figura 5-6. Diagrama de bloques del proceso térmico para la producción de cerveza sin gluten, indicando temperatura y tiempo de operación en cada etapa	71
Figura 5-7. Sistema de compresión mecánica (tecnología frigorífica)	89

1 OBJETIVOS Y ALCANCE

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar la ingeniería básica para la instalación de una planta de producción de cerveza artesanal sin gluten, con una capacidad de producción de 75.000 litros anuales. Para ello, se empleará un proceso biotecnológico basado en el uso de enzimas especializadas que degradan el gluten sin alterar la esencia de la cerveza. El producto final conservará sus características organolépticas, manteniendo el equilibrio de sabores, los matices aromáticos y la textura que definen una cerveza de calidad. De este modo, se garantizará una bebida que cumple con los estándares de certificación sin gluten, permitiendo a más consumidores disfrutar de una auténtica experiencia cervecera sin restricciones.

En cuanto al alcance, el proyecto se centrará en el estudio exhaustivo del proceso de producción de cerveza sin gluten, desde la selección inicial de las materias primas hasta la última fase de almacenamiento. Se seleccionarán, describirán y dimensionarán los equipos necesarios en concordancia con la capacidad de producción. Además, se llevará a cabo un análisis detallado de la acción enzimática, optimizando las condiciones para la degradación controlada del gluten. Se considerarán aspectos relacionados con la eficiencia operativa y el cumplimiento de las normativas de calidad y certificación sin gluten. Finalmente, se considerarán los requerimientos técnicos y regulatorios necesarios para asegurar la conformidad del proceso y producto.

Con este enfoque, la ingeniería de esta planta no solo permitirá la producción de cerveza sin gluten de alta calidad, sino que también abrirá la puerta a nuevas oportunidades en el mercado cervecero, combinando tradición e innovación para ofrecer una experiencia auténtica e inclusiva a todos los consumidores.

2 INTRODUCCIÓN

La cerveza es mucho más que una bebida; es cultura, tradición y un símbolo de convivencia en todo el mundo. Sin embargo, las personas con intolerancia al gluten o enfermedad celíaca han tenido que renunciar a la experiencia de disfrutar de una cerveza con el sabor auténtico de la malta tradicional. En respuesta a esta necesidad y a la creciente demanda de productos inclusivos, la industria cervecera está evolucionando con soluciones innovadoras que combinan tecnología y calidad sensorial.

2.1 Antecedentes

La producción de cerveza sin gluten ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido al aumento de la demanda de productos aptos para personas con celiacía e intolerancia al gluten [1]. A medida que la conciencia sobre estas condiciones de salud ha crecido, los consumidores han buscado alternativas alimenticias y bebidas que se adapten a sus necesidades dietéticas, siendo la cerveza una de las principales bebidas de interés. El origen de la cerveza sin gluten se remonta a la década de 1990, cuando la creciente prevalencia de enfermedades relacionadas con el gluten impulsó las primeras investigaciones sobre la adaptación de los procesos cerveceros tradicionales para excluir este componente.

El desarrollo de este tipo de cerveza ha requerido adaptar procesos clásicos de elaboración mediante tecnologías específicas que permiten reducir o eliminar el gluten, manteniendo los estándares de calidad. Entre los principales desafíos destacan la selección de materias primas alternativas y la implementación de controles rigurosos que eviten la contaminación cruzada. En este sentido, la legislación internacional, como la establecida por la OMS y otras agencias reguladoras, exige que los productos etiquetados como “sin gluten” contengan menos de 20 ppm [2], lo que supone un reto técnico para los productores.

España, con un mercado cervecero dinámico y en expansión, ha visto surgir un creciente número de cervecerías artesanales especializadas en productos sin gluten, en paralelo a la consolidación de grandes grupos cerveceros como:

- Mahou San Miguel, el mayor grupo cervecero nacional.
- Heineken España, filial del grupo holandés, con sedes en Sevilla, Madrid, Jaén y Valencia.
- Grupo DAMM, con sede en Barcelona y una fuerte presencia en el mercado.
- Hijos de Rivera, productor de la conocida Estrella Galicia.
- Compañía Cervecera de Canarias (CCC), con marcas como La Tropical o CCC Dorada [3].



Figura 2-1. Logotipo de los principales grupos cerveceros

Este ecosistema cervecero diverso ofrece un marco interesante para el diseño de nuevas plantas de producción, orientadas a cubrir esta demanda con soluciones técnicas eficientes y seguras.

2.2 Enfoque artesanal

La cerveza es una de las bebidas alcohólicas más antiguas y apreciadas del mundo, cuya elaboración ha estado tradicionalmente ligada a la fermentación de cereales como la cebada, el trigo o el maíz. Aunque su proceso ha evolucionado, el espíritu artesanal que define su producción se ha mantenido vigente, especialmente en la creación de cervezas con identidad propia y una elaboración rigurosa.

En los últimos años, el sector cervecero artesanal ha vivido un auge notable [4]. La producción a pequeña escala, la selección cuidadosa de ingredientes y la libertad para innovar en sabores y técnicas han permitido el desarrollo de propuestas más diversas y personalizadas. Este entorno ha propiciado la aparición de alternativas adaptadas a nuevas demandas, como las cervezas sin gluten, dirigidas a personas con necesidades dietéticas específicas.

El enfoque artesanal permite que la ingeniería básica de la producción se alinee con los principios fundamentales de este modelo: calidad, control y adaptabilidad. Así, el proyecto busca crear una planta de producción que no solo cumpla con las normativas de seguridad alimentaria para productos sin gluten, sino que también garantice que cada cerveza elaborada mantenga la riqueza sensorial y el carácter único que los consumidores esperan de una cerveza artesanal. Mas allá del diseño técnico, se busca establecer un entorno productivo que respete el proceso tradicional y potencie la esencia del producto final, en sintonía con los valores que definen a la cerveza artesanal. En la Tabla 2-1 se muestra una comparativa.

Tabla 2-1. Comparativa cerveza artesanal-industrial

Aspecto	Cerveza Artesanal	Cerveza Industrial
Objetivo principal	Cerveza de calidad	Maximizar beneficios
Proceso de producción	Pequeñas producciones, procesos más largos y cuidados	Producción en masa, procesos más rápidos y automatizados
Aditivos	Escasos y naturales	Conservantes artificiales
Calidad del producto	Enfocada en la calidad, sabor y frescura	Enfocada en consistencia y durabilidad del producto
Precio	Generalmente más cara debido a los ingredientes y procesos	Más económica por la producción a gran escala
Distribución	Cercana	Internacional
Tiempo de conservación	Menor tiempo de conservación debido a la ausencia de conservantes	Mayor tiempo de conservación gracias a aditivos y pasteurización
Innovación	Mayor experimentación con ingredientes y técnicas	Menor innovación, se prioriza la consistencia
Impacto ambiental	Producción mas sostenible y menor impacto ambiental en algunos casos	Mayor impacto debido a la producción masiva y transporte

2.3 Conceptos básicos sobre el gluten y la celiaquía

2.3.1 Definición de gluten y su impacto en la salud

El término gluten hace referencia a un complejo de proteínas presentes en ciertas gramíneas, como el trigo, la cebada y el centeno. Estas proteínas se dividen en dos grandes grupos: prolaminas y glutelinas, que en la cebada corresponden a la hordeína y a la glutenina, respectivamente. En particular, la hordeína es rica en residuos de prolina y glutamina, lo que la hace altamente resistente a la hidrólisis por las enzimas proteolíticas del sistema digestivo humano [5].

Desde un punto de vista culinario, el gluten es conocido por aportar elasticidad a las masas y permitir que los panes y otros productos horneados adquieran una textura esponjosa, gracias a la acción combinada de sus componentes en la formación de una red viscoelástica. Sin embargo, en el caso de la cebada, aunque no se utiliza comúnmente en panificación, sus proteínas tienen un rol tecnológico relevante en otros alimentos fermentados, como la cerveza, donde contribuyen a la estabilidad de la espuma y a la retención de dióxido de carbono.

Desde el punto de vista biológico, el gluten (y específicamente las prolaminas como la hordeína o la gliadina) no se digiere completamente en el tracto gastrointestinal. Algunos fragmentos peptídicos, especialmente aquellos derivados de la hordeína, resisten la acción de las enzimas gástricas, pancreáticas e intestinales, permaneciendo en el lumen intestinal en forma parcialmente degradada.

En individuos genéticamente predispuestos, estos fragmentos pueden atravesar una barrera epitelial intestinal comprometida (por inflamación, infecciones o aumento de la permeabilidad) y ser captados por células presentadoras de antígenos en la lámina propia. Este proceso puede desencadenar una respuesta inmunitaria anómala, generando una inflamación crónica del intestino delgado, caracterizada por atrofia de vellosidades, hiperplasia de criptas e infiltración linfocitaria intraepitelial. Como consecuencia, se produce una alteración en la absorción de nutrientes esenciales, como vitaminas, minerales y ácidos grasos, lo que puede derivar en deficiencias nutricionales y manifestaciones clínicas diversas.

2.3.2 La celiaquía y la intolerancia al gluten

La enfermedad celíaca es una patología inflamatoria crónica del intestino delgado, de origen inmunológico, que afecta aproximadamente al 1% de la población mundial. Su desencadenante principal es la exposición al gluten presente en cereales como el trigo, la cebada, el centeno y sus derivados, incluida la espelta. Esta condición se caracteriza por una respuesta inmunitaria desproporcionada frente a fragmentos peptídicos del gluten, lo que ocasiona daño en las vellosidades intestinales, estructuras esenciales para la absorción de nutrientes [6].

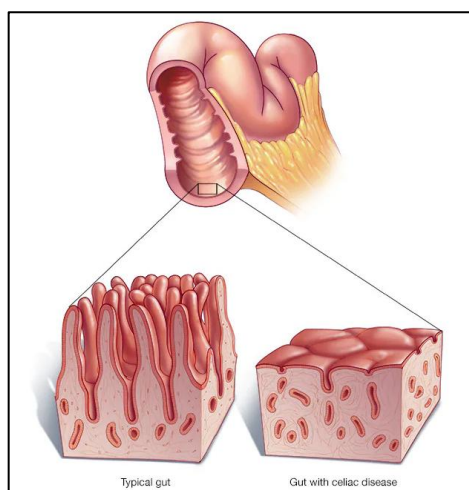


Figura 2-2. Intestino con enfermedad celíaca

A consecuencia de esta atrofia vellositaria, los pacientes celíacos pueden presentar déficits nutricionales significativos, con manifestaciones clínicas como anemia ferropénica, osteoporosis, pérdida de peso, e incluso retraso del crecimiento en la infancia. Además de los síntomas digestivos típicos (diarrea crónica, distensión abdominal, dolor), muchos afectados desarrollan manifestaciones extraintestinales como fatiga persistente, cefaleas, erupciones cutáneas o dolor articular, lo que puede dificultar su diagnóstico [7].

La celiaquía puede diagnosticarse a cualquier edad, y su desarrollo depende de una base genética bien definida: la presencia de los alelos HLA-DQ2 o HLA-DQ8, que predisponen a una activación inadecuada del sistema inmune frente al gluten [5]. En estos individuos, los péptidos derivados de prolaminas como la gliadina (en el trigo) o la hordeína (en la cebada) son reconocidos por células T del sistema inmunológico intestinal, generando una cascada inflamatoria que deteriora progresivamente la arquitectura del epitelio intestinal.

Actualmente, no existe una cura definitiva para la enfermedad celíaca, y el único tratamiento eficaz consiste en una dieta estricta libre de gluten durante toda la vida. Sin embargo, mantener dicha dieta puede ser un desafío considerable, ya que entre el 30% y el 50% de los pacientes continúan presentando síntomas debido a la contaminación cruzada [8] con gluten en alimentos procesados, utensilios o entornos domésticos.

Aunque se están investigando nuevas terapias farmacológicas, como los inhibidores de la enzima transglutaminasa 2 [9], estas aún se encuentran en fase experimental y no reemplazan la necesidad de una dieta estricta libre de gluten. En este contexto, la disponibilidad de alternativas alimentarias seguras resulta fundamental para mejorar la calidad de vida de las personas celíacas, al tiempo que promueve su inclusión tanto en el ámbito social como en el gastronómico.

Además de las personas diagnosticadas con celiaquía, existe un grupo creciente de consumidores que padece sensibilidad al gluten no celíaca [10], una condición que provoca síntomas similares sin que exista un daño intestinal detectable. También hay quienes, sin un diagnóstico específico, optan por reducir el consumo de gluten por motivos de bienestar digestivo.

2.4 Fundamentos de la elaboración de cerveza

2.4.1 Historia y evolución de la cerveza

La historia de la cerveza se remonta a tiempos inmemoriales, entrelazada con mitos, leyendas y el desarrollo de las primeras civilizaciones. En el antiguo Egipto, su invención se atribuía al dios Osiris, considerado el responsable de enseñar a la humanidad la elaboración de esta bebida fermentada. Sin embargo, evidencias arqueológicas sugieren que el consumo de bebidas alcohólicas a base de cereales y frutos silvestres data de hace aproximadamente 100.000 años, cuando los grupos humanos primitivos descubrieron la fermentación accidentalmente al masticar y dejar reposar estos ingredientes, dando lugar a un brebaje de efectos relajantes y estimulantes [11].

Las primeras referencias escritas sobre la producción cervecera provienen de tablillas sumerias de arcilla del 4.000 a.C., donde se menciona una bebida denominada "siraku", obtenida mediante la fermentación de granos. En estos registros, se describe un rudimentario proceso de producción que consistía en la cocción de pan, su posterior desmenuzamiento en migajas y su mezcla con agua para obtener un líquido embriagador que transformaba el estado de ánimo de sus consumidores, generando euforia y sociabilidad. Este método de producción fue fundamental en las primeras civilizaciones mesopotámicas y permitió que la cerveza se consolidara como una bebida consumida tanto en el ámbito cotidiano como en contextos ceremoniales [12].

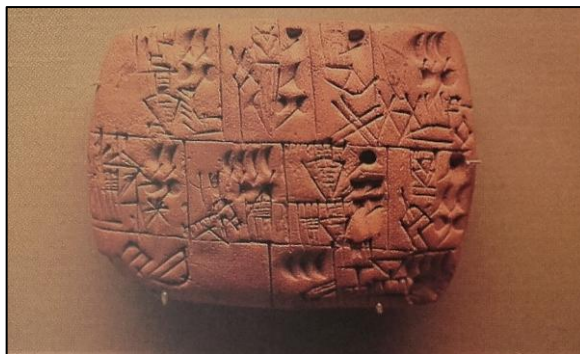


Figura 2-3. Documento sumerio escrito sobre piedra

Desde su origen en la región mesopotámica, la producción y el consumo de cerveza se expandieron a lo largo de la cuenca oriental del Mediterráneo. En Egipto, la adopción y perfeccionamiento de las técnicas sumerias dieron lugar a una variante denominada "zythum", caracterizada por el uso de malta y la incorporación de ingredientes como miel, jengibre, azafrán y comino, lo que mejoraba su sabor y aroma. Mientras que en la cultura grecorromana la cerveza era considerada una bebida propia de las clases populares, en el norte de Europa adquirió un estatus ceremonial, siendo utilizada en rituales religiosos y en celebraciones de victorias militares.

La Edad Media marcó un punto de inflexión en la evolución de la cerveza con la consolidación de la "cervisa monacorum", la cerveza producida en los monasterios. Los monjes perfeccionaron el proceso de fabricación, mejorando su sabor, aroma y estabilidad. A partir del siglo XIV, surgieron los primeros grandes centros de producción cervecera en ciudades como Hamburgo y Ziratu, lo que impulsó la estandarización de su elaboración. Este proceso culminó en 1516 con la promulgación de la Ley de Pureza de Baviera (Reinheitsgebot) por el duque Guillermo IV, que establecía que la cerveza debía elaborarse únicamente con agua, malta y lúpulo, excluyendo otros aditivos que pudieran comprometer su calidad [13].

El verdadero auge de la cerveza tuvo lugar con la llegada de la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII. La incorporación de la máquina de vapor en la producción cervecera permitió un aumento exponencial en la capacidad de fabricación y una mayor uniformidad en el producto. No obstante, el descubrimiento más trascendental en este ámbito ocurrió en el siglo XIX, cuando Louis Pasteur identificó el papel de los microorganismos en el proceso de fermentación, lo que posibilitó un mayor control sobre la producción y garantizó la estabilidad y durabilidad de la cerveza [14].

En cuanto a la diversidad de esta bebida a lo largo de la historia, existen registros que evidencian la existencia de múltiples variedades. Uno de los documentos más antiguos donde se mencionan distintos tipos de cerveza es la Pirámide de Unas, perteneciente a la V Dinastía de Egipto, en la que se hace referencia a una variedad denominada "Tnm". A lo largo de las siguientes dinastías egipcias, se han documentado hasta 17 tipos distintos, aunque es probable que existieran muchos más, ya que cada maestro cervecero implementaba métodos y combinaciones particulares.

Las cervezas egipcias podían elaborarse con trigo rojo, ser más espesas, malteadas o de mayor graduación alcohólica, además de incluir ingredientes como dátiles o especias para modificar su perfil sensorial. El contenido alcohólico variaba según la técnica de producción, oscilando entre los 4 grados de alcohol en las versiones más ligeras y los 14 grados o más en las cervezas más fuertes. Mientras que las clases populares consumían una bebida densa, turbia y con baja carbonatación, las élites tenían acceso a versiones más refinadas, enriquecidas con aromas naturales [15].

Estos avances en la producción cervecera han sentado las bases para el desarrollo de la industria moderna, que continúa evolucionando mediante innovaciones tecnológicas y científicas, consolidando a la cerveza como una de las bebidas fermentadas más importantes a nivel mundial.

2.4.2 Proceso tradicional de producción de cerveza

La cerveza es una bebida alcohólica que se obtiene a través de un proceso de fermentación que implica la transformación del azúcar contenido en el mosto en alcohol y dióxido de carbono, gracias a la acción de levaduras seleccionadas. Este proceso tiene su origen en la malta, que se obtiene a partir de granos de cebada que pasan por una serie de etapas, como la germinación, el secado y el tostado. Al mosto resultante de esta malta se le agregan lúpulos, que no solo aportan amargor, sino también aromas y sabores característicos a la cerveza.

El proceso tradicional de elaboración de cerveza consta de las siguientes etapas:

1. **Malteado:** La cebada se humedece, germina y se deshidrata mediante tostado para producir malta. Este proceso convierte el almidón del grano en azúcares fermentables [3].
2. **Molienda:** La malta se muele para romper el grano y exponer el almidón. Una molienda adecuada facilita la conversión de los almidones y mejora el rendimiento en la maceración.
3. **Maceración:** La malta molida se mezcla con agua caliente en el "mash tun". Las enzimas activadas por el calor transforman los almidones en azúcares, generando un líquido dulce llamado mosto.
4. **Filtrado:** Se separa el mosto de los residuos sólidos del grano. A menudo se enjuaga el bagazo con agua caliente para extraer más azúcares (sparging).
5. **Cocción:** El mosto se hierve con lúpulos durante 60 a 90 minutos. Esta etapa esteriliza el líquido, extrae los compuestos del lúpulo y aporta amargor, aroma y sabor a la cerveza.
6. **Whirlpool:** se utiliza una técnica de remolino para clarificar el mosto. Este remolino permite que los sólidos suspendidos, como proteínas coaguladas y residuos del lúpulo, se concentren en el centro del fondo del recipiente, facilitando su separación.
7. **Enfriamiento:** Tras el Whirlpool, el mosto se enfría rápidamente para alcanzar la temperatura ideal para la fermentación, evitando contaminaciones.
8. **Fermentación:** Se añade levadura al mosto enfriado. Esta consume los azúcares y produce alcohol, CO_2 y compuestos aromáticos. La duración depende del tipo de levadura y temperatura.
9. **Maduración:** Aquí los sabores se equilibran y se eliminan sedimentos.
10. **Filtrado y carbonatación:** Se filtra para mejorar claridad y estabilidad. La carbonatación puede generarse naturalmente o mediante adición de CO_2 .
11. **Envasado:** La cerveza se envasa en botellas, latas o barriles. Se etiqueta y almacena, lista para su distribución. En algunos casos, se deja envejecer para desarrollar sabores más complejos [13].



Figura 2-4. Proceso tradicional de producción de cerveza

2.5 Cerveza sin gluten: Definición y características

2.5.1 Valor nutritivo de la cerveza

La cerveza sin gluten es una alternativa ideal para las personas con intolerancia al gluten o enfermedad celíaca, ya que permite disfrutar de los beneficios de la cerveza tradicional sin comprometer la salud. Aunque se elabora principalmente a partir de malta de cebada, el proceso de fabricación incluye la adición de enzimas que degradan el gluten durante la fermentación. Este procedimiento asegura que el producto final sea apto para quienes deben evitar el gluten por razones médicas.

La composición nutricional de la cerveza sin gluten es similar a la de la cerveza convencional. Entre sus componentes principales se encuentran los carbohidratos, que proporcionan energía rápida. También contiene proteínas, aunque en menor proporción, que son esenciales para la reparación de tejidos. En cuanto a las vitaminas, la cerveza sin gluten incluye algunas del complejo B, como la B12 y el ácido fólico [3], que son cruciales para el sistema nervioso y la producción de glóbulos rojos. Además, aporta minerales como magnesio, fósforo y potasio, que son vitales para el buen funcionamiento del organismo. En algunos casos, dependiendo del cereal utilizado, la cerveza sin gluten puede contener fibra, lo que contribuye a mejorar la digestión y regular el tránsito intestinal.

El consumo moderado de cerveza sin gluten puede aportar beneficios para la salud. Al igual que la cerveza regular, puede contribuir a la salud cardiovascular, ya que el consumo moderado puede aumentar los niveles de colesterol "bueno" (HDL) [16]. Además, el contenido en silicio de la cerveza sin gluten favorece la salud ósea y puede ayudar a prevenir la osteoporosis [17]. También tiene efectos positivos sobre la digestión, ya que los prebióticos presentes pueden mantener una flora intestinal equilibrada. Aunque contiene menos propiedades diuréticas que la cerveza tradicional, aún puede ayudar a reducir el riesgo de cálculos renales gracias a su capacidad para promover la diuresis.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que, aunque la cerveza sin gluten no contiene gluten en cantidades significativas, su consumo debe seguir siendo moderado. Algunas personas extremadamente sensibles pueden reaccionar a trazas de gluten que puedan quedar en el producto final, por lo que siempre es esencial verificar que la cerveza esté certificada como completamente libre de gluten. Además, como cualquier bebida alcohólica, la cerveza sin gluten contiene alcohol y calorías, por lo que su consumo excesivo puede tener efectos negativos para la salud, como problemas hepáticos, cardiovasculares y digestivos. También es importante revisar la información nutricional de las etiquetas, ya que algunas marcas pueden añadir azúcares adicionales, lo que puede incrementar su contenido calórico.

2.5.2 Materias primas empleadas

Para llevar a cabo el proceso de elaboración, se utilizan cuatro ingredientes principales: cebada, lúpulo, agua y levadura. Además, se puede añadir un quinto componente llamado "adjuntos", que se incorpora con un propósito específico según las características que se deseen en el producto final.

2.5.2.1 Cebada

La cebada es un cereal de origen vegetal que pertenece a la familia de las Poaceae (Gramíneas). Se la considera un cereal de invierno, ya que se siembra en otoño y se cosecha en verano. Es originaria de la región de Israel y su uso se remonta a la antigüedad, tanto en la alimentación como en la fermentación de bebidas [18]. Dentro de la especie *Hordeum vulgare*, se pueden distinguir morfológicamente dos tipos principales según el número de espiguillas por nudo en la espiga: la cebada de dos carreras, más valorada para la industria cervecera por su contenido homogéneo de almidón y proteínas, y la cebada de seis carreras, con espigas más densas y granos irregulares, más comúnmente empleada para otros fines como la alimentación animal.

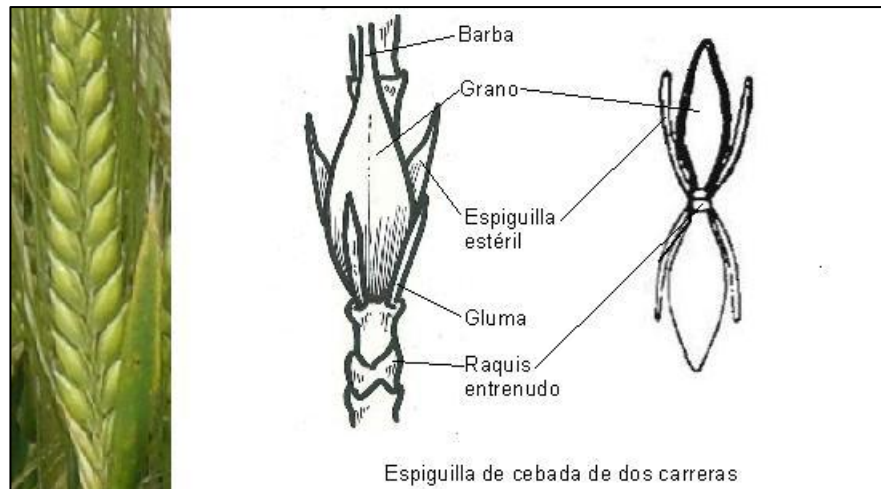


Figura 2-5. Cebada cervecera de dos carreras

Entre las principales ventajas de la cebada para la producción cervecera se destacan:

- Su elevado contenido de almidón, que proporciona una fuente abundante de azúcares fermentables.
- Su potencial enzimático, fundamental para convertir los polisacáridos durante la maceración.
- La presencia de una cascarilla externa, que facilita el proceso de filtrado del mosto.
- Su bajo contenido lipídico, que reduce el riesgo de oxidaciones y la aparición de sabores no deseados.

Estas características, sumadas a su adaptabilidad agrícola y disponibilidad global, convierten a la cebada en el cereal preferido para la elaboración de cerveza. En la Tabla 2-2 se recoge su composición.

Tabla 2-2. Composición de la cebada [3]

Componente	Porcentaje
Celulosa	4,3-4,9 %
Almidón y otros carbohidratos	58-60 %
Grasas	2-2,3 %
Proteínas	10-11 %
Otros compuestos nitrogenados	3,2-3,4 %
Sales minerales	2,3-2,6 %
Humedad	10-20 %

2.5.2.2 Lúpulo

El lúpulo es una planta trepadora perenne de la familia de las Cannabaceae, conocida científicamente como *Humulus lupulus*. Se trata de una especie rizocárpica (rebrote desde el rizoma tras ser cortada), de cultivo permanente que puede durar hasta 20 años. Su sistema radicular es profundo y ramificado, mientras que sus tallos sarmentosos, que pueden alcanzar hasta 12 metros de longitud, requieren de tutores (postes y alambres) para su guiado en las plantaciones.

Presenta hojas palmatilobuladas, generalmente con 3 a 5 lóbulos. El lúpulo es una planta dioica, lo que significa que existen individuos masculinos y femeninos. Las flores femeninas, no fecundadas, se agrupan en conos florales formados por escamas, y son estas estructuras las que se utilizan en cervecería. Dentro de las glándulas de estas escamas se encuentra la lupulina, una sustancia amarilla de aroma característico y sabor amargo, rica

en compuestos químicos esenciales para la elaboración de la cerveza.

Desde el punto de vista agronómico, el lúpulo requiere suelos profundos, bien drenados y con alto contenido de calcio, desarrollándose mejor en climas húmedos, con buena disponibilidad hídrica durante todo el año. Los conos de lúpulo, una vez recolectados y desecados, se utilizan por su contenido en ácidos alfa y aceites esenciales [19].

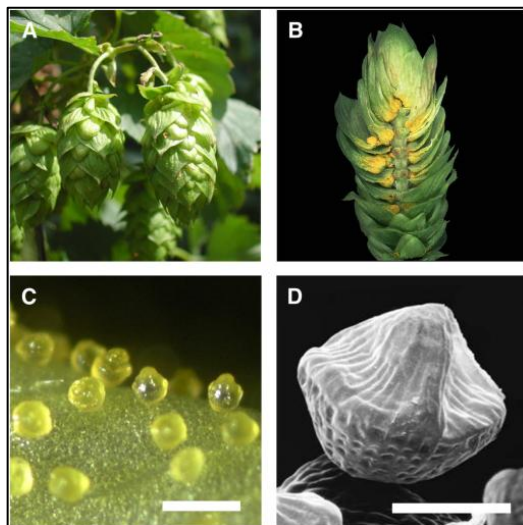


Figura 2-6. Morfología de los conos de lúpulo y las glándulas de lupulina

Las funciones principales del lúpulo en cervecería son:

- Aportar amargor, que equilibra la dulzura de la malta.
- Incorporar aroma y sabor específicos al producto.
- Mejorar la retención de espuma.
- Actuar como antimicrobiano natural, alargando la vida útil de la cerveza.

El momento de la adición del lúpulo (inicio, mitad o final del hervor, o incluso en frío) afecta a las propiedades que prevalecen: amargor en las adiciones tempranas y aroma en las tardías. En la tabla 2-3 se muestra su composición.

Tabla 2-3. Composición media del lúpulo seco [3]

Componente	Porcentaje
Agua	10-12 %
Cenizas	7-7,7 %
Aceites aromáticos	0,4-0,5 %
Resinas	18-18,5 %
Compuestos nitrogenados	17-18 %
Compuestos no nitrogenados	27-28 %

2.5.2.3 Agua

El agua es uno de los ingredientes esenciales en la elaboración de la cerveza. Naturalmente contiene diversas sales disueltas que influyen de manera significativa en la calidad final del producto.

Uno de los parámetros más relevantes es la dureza del agua, que está determinada por la cantidad de sales

minerales presentes, especialmente compuestos de calcio, magnesio y sodio. Este factor afecta tanto el sabor como el proceso de producción.

- El agua blanda se caracteriza por un contenido bajo de sales disueltas (menos de 0,5 partes por mil). Es preferida para cervezas ligeras y claras, ya que su bajo contenido en minerales permite sabores más limpios y delicados.
- El agua dura, en cambio, contiene un alto nivel de sales disueltas, siendo más adecuada para cervezas oscuras y robustas. Se distingue por superar los 120 mg/l de carbonato cálcico y puede tener un contenido notable de calcio, sodio y magnesio.

Existen dos tipos de agua dura:

- Agua de dureza temporal: Rica en carbonatos, su dureza puede eliminarse calentando el agua o añadiendo cal para que los minerales precipiten.
- Agua de dureza permanente: Contiene sulfatos, cloruros y otros compuestos como el sulfato cálcico o magnésico, cuya dureza no se elimina fácilmente mediante ebullición. En estos casos, se requiere una filtración fina o tratamientos químicos específicos.

La elección del tipo de agua y su tratamiento es una decisión técnica que impacta en la fermentación, el pH del mosto, la estabilidad de la espuma, y por supuesto, en el perfil sensorial de la cerveza terminada. En la Tabla se aprecia la composición del agua utilizada en la producción de cervezas fuertes (agua más dura) y producción de cervezas ligeras (agua más blanda) [3].

Tabla 2-4. Composición del agua para la fabricación de cerveza

	Cerveza fuerte (g/hl)	Cerveza ligera (g/hl)
Dureza total	14,80	1,57
Dureza no carbonatada	0,60	0,30
Dureza de carbonatos	14,20	1,27
CaO	10,60	0,98
MgO	3,0	0,12
Sulfatos	0,75	0,43
CO ₂	11,15	1,0
Nitratos	Trazas	Trazas
Cloruros	0,16	0,5

2.5.2.4 Levadura

La levadura es un microorganismo unicelular eucariota perteneciente al reino de los hongos. Su principal función es transformar los azúcares presentes en el mosto (provenientes de la malta) en alcohol etílico y dióxido de carbono mediante el proceso de fermentación alcohólica.

Durante la fermentación, las moléculas de azúcar se introducen en el interior de la célula de levadura por difusión. Una vez dentro, son transformadas en etanol y CO₂. Además, la levadura genera compuestos secundarios como ésteres, alcoholes superiores, cetonas y ácidos, que influyen directamente en el perfil organoléptico (aroma y sabor) de la cerveza.

Existen dos grandes grupos de levaduras usadas en cervecería:

- Levaduras de fermentación alta (Ale): del tipo *Saccharomyces cerevisiae*, trabajan a temperaturas más altas (15-24 °C) y producen cervezas con mayor complejidad aromática.
- Levaduras de fermentación baja (Lager): del tipo *Saccharomyces pastorianus*, trabajan a temperaturas más bajas (7-13°C), generando cervezas limpias y con menor presencia de subproductos de fermentación [20].

La selección de la cepa de levadura es una decisión crítica, ya que define en gran medida el carácter final de la

cerveza. Además, su manejo durante el proceso (temperatura, oxigenación, pH, nutrientes) influye directamente en su rendimiento y en la calidad del producto.

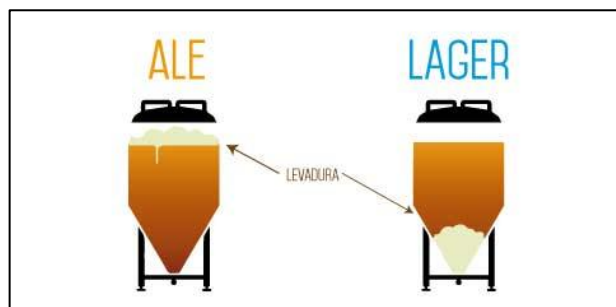


Figura 2-7. Posiciones de levadura en la fermentación

2.5.2.5 Enzima degradadora de gluten

Una de las más utilizadas para este fin es la prolyl endopeptidasa (PEP), una enzima que actúa sobre las proteínas del gluten, especialmente aquellas que contienen el aminoácido prolina, como la gliadina y la glutenina. La PEP tiene la capacidad de romper enlaces peptídicos específicos, fragmentando el gluten en péptidos más pequeños que no son reconocidos por el sistema inmune ni detectados por los métodos analíticos comunes, como la prueba ELISA R5.

La enzima se añade antes de la fermentación, cuando el mosto ya ha sido cocido y enfriado. Durante los primeros días de fermentación, bajo condiciones controladas de temperatura (alrededor de 20 °C) y pH (entre 5 y 5,5), la enzima actúa eficientemente, reduciendo el contenido de gluten hasta niveles considerados seguros. Una vez completada la fermentación y enfriada la cerveza para su maduración, la actividad enzimática se detiene.

Al usar esta enzima se puede seguir utilizando cebada como cereal base. Mejora también la estabilidad coloidal, ayudando a prevenir la formación de turbidez en la cerveza embotellada o envasada [\[21\]](#).

2.5.3 Tecnología y adaptaciones del proceso para cerveza sin gluten

En la producción de cerveza sin gluten existen distintos enfoques, cada uno con sus ventajas y desafíos. Los más comunes son:

1. Uso de cereales naturalmente libres de gluten: consiste en reemplazar completamente la cebada y otros granos que contienen gluten por alternativas como sorgo, maíz, arroz o trigo sarraceno. Este método garantiza la ausencia de gluten desde el origen, pero implica rediseñar completamente la receta y adaptar el proceso productivo debido a las diferencias de estos cereales.
2. Elaboración a partir de cebada malteada con degradación enzimática del gluten: se mantiene la cebada y el proceso tradicional, pero se añaden enzimas específicas que descomponen el gluten durante la elaboración, reduciéndolo por debajo del umbral permitido (menos de 20 ppm). Este es el enfoque en el que se centra este trabajo.
3. Filtración del gluten: aunque menos común, algunas técnicas intentan eliminar el gluten mediante procesos físicos de filtración o separación, aunque su eficacia puede ser limitada.
4. Fermentación con levaduras modificadas genéticamente: en investigación, existen cepas de levadura diseñadas para evitar la formación de péptidos con gluten o incluso degradarlos. Aunque prometedoras, estas tecnologías aún no están ampliamente adoptadas en la industria.

A continuación, se detalla el enfoque principal de este trabajo: el uso de enzimas degradadoras de gluten. Esta estrategia tiene como objetivo conservar tanto la cebada malteada como el proceso tradicional de elaboración de cerveza, partiendo de una premisa clara: mantener el proceso clásico con la mínima intervención posible. Sin embargo, aunque externamente el proceso no parece cambiar, sí requiere importantes adaptaciones técnicas y organizativas:

- Integración de una etapa enzimática crítica: las enzimas prolyl endopeptidasas se añaden habitualmente al inicio de la fermentación. Su efectividad depende de condiciones de temperatura, pH y tiempo de contacto, lo que implica un control riguroso de esta etapa. La enzima se convierte en un actor activo del proceso, que necesita vigilancia.
- Redefinición del control de calidad: producir cerveza "sin gluten" bajo esta modalidad obliga a realizar análisis sistemáticos del producto final para verificar que se ha alcanzado el umbral inferior a 20 ppm de gluten. Esto implica incorporar ensayos ELISA validados, definir puntos críticos de muestreo y establecer protocolos de trazabilidad que antes podían no ser necesarios.
- Protocolos de limpieza reforzados: aunque el proceso sigue siendo el tradicional, el riesgo de contaminación cruzada adquiere una dimensión crítica. Se debe asegurar que los equipos estén libres de residuos de gluten cuando se alternan lotes con y sin gluten, lo que puede implicar inversiones en sistemas CIP (sistemas de limpieza automatizada "in situ") más eficientes o incluso líneas dedicadas en plantas más grandes.
- Gestión documental y etiquetado: la producción de cerveza con enzimas requiere también adaptaciones en la documentación técnica del producto, en la declaración de ingredientes y en la trazabilidad interna, de modo que todo el proceso pueda ser comprobado tanto por autoridades como por certificadoras.

A diferencia del método enzimático, el enfoque de sustituir la materia prima conlleva el replanteamiento completo de la receta, sustituyendo los granos que contienen gluten por cereales naturalmente libres de esta proteína. Este cambio, aunque más radical, ofrece una seguridad intrínseca respecto al contenido en gluten, pero implica una serie de desafíos tecnológicos mucho más profundos [22].

- Diseño de recetas desde cero: los cereales sin gluten como el sorgo, arroz, maíz o trigo sarraceno presentan características enzimáticas y de composición muy diferentes. Esto obliga a rediseñar completamente el perfil del mosto, adaptando no solo proporciones sino también tiempos, temperaturas y pH en la maceración.
- Necesidad de complementación enzimática externa: a diferencia de la cebada malteada, que aporta su propio arsenal enzimático, muchos de estos cereales no malteados requieren la adición de enzimas industriales para convertir almidones en azúcares fermentables. Se rompe así con la autarquía enzimática tradicional del proceso cervecero.
- Fermentaciones menos predecibles: los mostos obtenidos a partir de estos cereales suelen tener un perfil nutricional menos equilibrado para la levadura. Esto puede provocar fermentaciones más lentas, menor atenuación o incluso formación de compuestos no deseados, lo que obliga a un seguimiento más intensivo.
- Diferencias sensoriales: aunque se intenta emular el perfil de una lager o una ale clásica, estos cereales aportan características propias que pueden alejarse del estándar de referencia. Para muchos cerveceros artesanales, esto representa un campo fértil para la experimentación, aunque para los consumidores más tradicionales puede suponer una barrera de aceptación.
- Adaptación del equipo industrial: si bien no siempre es necesario cambiar de maquinaria, algunos procesos como el molino o el sistema de filtrado pueden requerir ajustes debido a las propiedades físicas distintas de los nuevos granos.

Este enfoque ofrece ventajas desde el punto de vista de seguridad alimentaria, pero exige una reinención del proceso cervecero desde la base.

2.5.4 Normativa aplicable a la actividad

La actividad de fabricación de cerveza artesanal sin gluten desarrollada en esta planta se encuentra regulada por diferentes normativas en función de su impacto ambiental, su naturaleza alimentaria, su régimen fiscal y su etiquetado específico por estar dirigida a personas con intolerancia al gluten. A continuación, se detallan las principales normas aplicables:

2.5.4.1 Normativa ambiental (Andalucía)

Dado que la actividad se desarrolla en Andalucía y tiene un impacto sobre el entorno, debe cumplir con la normativa ambiental autonómica. Esta legislación regula el control y la evaluación ambiental de las actividades industriales, así como las condiciones para su ejercicio en función del riesgo y la capacidad de producción:

- Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (GICA), que regula el control ambiental de las actividades económicas en Andalucía.
BOJA n° 143, de 20 de julio de 2007.
- Decreto 356/2010, de 3 de agosto, que aprueba el Catálogo de actividades sometidas a Autorización Ambiental Integrada (AAI) y Calificación Ambiental.
La actividad de fabricación de cerveza se incluye en el Grupo 07.07 – Industrias de bebidas, siendo considerada de baja capacidad y, por tanto, sometida a Calificación Ambiental municipal.
BOJA n° 157, de 11 de agosto de 2010.
- Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC) Aplica a instalaciones industriales potencialmente contaminantes.
BOE n° 157, de 2 de julio de 2002.

2.5.4.2 Normativa de clasificación económica

La actividad debe estar correctamente clasificada a efectos económicos y fiscales, lo que permite su identificación en censos oficiales y la aplicación de tributos correspondientes:

- CNAE 1105, Fabricación de cerveza, según el Real Decreto 475/2007 que aprueba la Clasificación Nacional de Actividades Económicas.
- IAE, Epígrafe 422.4, correspondiente a la fabricación de cervezas, según el Real Decreto Legislativo 1175/1990, por el que se aprueban las tarifas del Impuesto sobre Actividades Económicas.

2.5.4.3 Normativa sanitaria

Al tratarse de un producto alimentario, la planta debe cumplir con las disposiciones sanitarias vigentes en materia de seguridad e higiene. Estas normas garantizan la seguridad del producto y la trazabilidad durante todo el proceso de producción:

- Real Decreto 191/2011, de 18 de febrero, sobre Registro General Sanitario de Empresas Alimentarias y Alimentos (RGSEAA), que establece la obligación de inscribir la actividad para poder comercializar productos alimentarios.
BOE n° 49, de 26 de febrero de 2011.
- Reglamento (CE) n° 178/2002, de 28 de enero, por el que se establecen los principios generales de la legislación alimentaria y se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria.
DOUE L 31, de 1 de febrero de 2002.
- Reglamento (UE) n° 853/2004, relativo a la higiene de los productos alimenticios.
DOUE L 139, de 30 de abril de 2004.

2.5.4.4 Normativa aplicable a la cerveza como producto

Además de las normas alimentarias generales, la cerveza está sujeta a una reglamentación técnico-sanitaria específica que define los requisitos de elaboración, composición, análisis y comercialización del producto:

- Real Decreto 53/1995, de 20 de enero, por el que se aprueba la Reglamentación técnico-sanitaria para la elaboración, circulación y comercio de la cerveza.

BOE n° 49, de 27 de febrero de 1995.

- Orden de 15 de octubre de 1985, por la que se aprueban los métodos oficiales de análisis de la cerveza.
BOE n° 252, de 21 de octubre de 1985.
- Real Decreto 678/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba la norma de calidad de la cerveza y de las bebidas de malta.
BOE n° 309, de 23 de diciembre de 2016.

2.5.4.5 Normativa sobre etiquetado sin gluten y alérgenos

El etiquetado es especialmente relevante en este tipo de productos, ya que se dirigen a personas con intolerancia al gluten. La legislación exige declarar la presencia de alérgenos y establece criterios claros sobre cuándo un alimento puede considerarse "sin gluten":

- Reglamento (UE) N° 1169/2011, sobre la información alimentaria facilitada al consumidor. Establece la obligación de declarar 14 alérgenos, incluyendo los cereales con gluten, y cómo debe presentarse esta información en el etiquetado.
DOUE L 304/18, de 22 de noviembre de 2011.
- Reglamento (UE) N° 828/2014, sobre los requisitos para la información relativa a la ausencia o presencia reducida de gluten en los alimentos. "Sin gluten": contenido <20 mg/kg (20 ppm). "Muy bajo en gluten": contenido <100 mg/kg.
DOUE L 228/5, de 31 de julio de 2014.
- Marca de Garantía FACE—"Controlado por FACE". Certificación voluntaria gestionada por la Federación de Asociaciones de Celíacos de España. Garantiza contenido <10 ppm de gluten y requiere auditorías anuales bajo el sistema APPCC (Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control).



Figura 2-8. Logo "Controlado por FACE"

- ELS-Sistema de Licencia Europeo. Certificación reconocida internacionalmente para productos sin gluten. Controla que el contenido de gluten no supere 20 ppm. Requiere licencia y código identificador por país y producto.



Figura 2-9. Símbolo ELS

2.5.4.6 Normativa fiscal (Impuestos Especiales)

Como bebida alcohólica, la cerveza está sujeta a Impuestos Especiales que gravan su fabricación. Esta normativa define obligaciones fiscales, controles de producción y liquidación de tributos:

- Ley 38/1992, de 28 de diciembre, de Impuestos Especiales. Regula los tributos que gravan, entre otros, la fabricación de bebidas alcohólicas. *BOE n° 312, de 29 de diciembre de 1992.*
- Real Decreto 1165/1995, de 7 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de los Impuestos Especiales. *BOE n° 179, de 28 de julio de 1995.*

2.5.4.7 Normativa sobre envasado

El producto final debe ser envasado de acuerdo con la legislación sobre envases, tanto en lo relativo al contenido como a las características del recipiente. Además, se exige un control efectivo del contenido y una gestión responsable de residuos:

- Real Decreto 1801/2008, de 3 de noviembre, sobre las cantidades nominales de productos envasados y control de contenido efectivo. *BOE n° 271, de 10 de noviembre de 2008.*
- Real Decreto 703/1988, de 1 de julio, sobre características de las botellas como recipientes-medida. *BOE n° 162, de 7 de julio de 1988.*
- Ley 11/1997, de 24 de abril, de Envases y Residuos de Envases. Previene y reduce el impacto ambiental de los envases a lo largo de su ciclo de vida. *BOE n° 99, de 25 de abril de 1997.*

2.5.4.8 Normativa aplicable en protección del trabajador

La planta debe garantizar condiciones seguras de trabajo para su personal, aplicando medidas preventivas frente a riesgos laborales, incluidos los derivados de vibraciones, ruidos o manipulación de maquinaria:

- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. *BOE n° 269, de 10 de noviembre de 1995.*
- Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre protección de los trabajadores frente a riesgos por vibraciones mecánicas. *BOE n° 269, de 10 de noviembre de 2005.*

2.5.4.9 Normativa aplicable en seguridad contra incendios

Por último, toda instalación industrial debe cumplir con medidas de seguridad frente a incendios, adecuadas a las características del proceso y de los materiales presentes en planta:

- Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales. *BOE n° 303, de 17 de diciembre de 2004.*

3 ESTUDIO DE MERCADO

3.1 Panorama general del mercado de cerveza artesanal en España

El sector de la cerveza artesanal en España ha mantenido una evolución positiva y resiliente durante la última década, consolidándose como una alternativa sólida dentro del panorama cervecero nacional. A pesar de los desafíos provocados por la pandemia y las tensiones económicas recientes, el consumo y la producción han retomado la senda de crecimiento. Según el Observatorio Sectorial DBK, en 2022 la producción de cerveza artesanal en España alcanzó los 244.000 hectolitros, lo que representa un incremento del 16,7% respecto al año anterior y supera los niveles prepandemia. Esta recuperación ha estado impulsada tanto por el aumento de la demanda como por una mayor diversificación de la oferta, que responde a las nuevas preferencias de consumidores más informados, exigentes y orientados hacia productos locales y de calidad.

No obstante, el número de fabricantes ha experimentado una ligera contracción: de más de 520 microcerveceras en 2019, se ha pasado a 476 en abril de 2023. Esta reducción no indica un retroceso del sector, sino más bien una concentración del mercado en operadores con mayor capacidad productiva, experiencia y cobertura territorial. Cataluña se mantiene como el epicentro de la producción con el 23% de las cerveceras artesanas, seguida de Andalucía (14%) y Castilla y León. Esta geografía refleja el peso del tejido agroalimentario local y la cultura cervecera regional.

En términos económicos, el volumen de negocio del sector alcanzó los 72 millones de euros en 2022, un 24% más que en 2021, favorecido por el incremento de los precios y una recuperación de la actividad en el canal HORECA (hoteles, restaurantes y cafeterías). Sin embargo, esta expansión se ha visto moderada por la presión de los costes: el encarecimiento de las materias primas, los costes logísticos y la energía ha impactado la rentabilidad de muchas pequeñas cerveceras, especialmente aquellas con menor escala operativa [\[23\]](#).

Por otro lado, según datos de la Asociación Española de Cerveceros Artesanos Independientes (AECAI), la cuota de mercado de la cerveza artesanal sigue siendo reducida, pero su aportación a la innovación, a la diversificación del mercado y al desarrollo económico local es significativa. El 87% de estas fábricas se encuentran en entornos rurales, lo que convierte al sector en un motor de economía local y fijación de población [\[24\]](#).

El perfil del consumidor de cerveza artesanal continúa dominado por personas entre los 25 y 45 años, con una creciente presencia femenina y una mayor conciencia medioambiental y gastronómica [\[25\]](#).

3.2 Situación del mercado de cerveza sin gluten

El mercado de productos sin gluten se encuentra en plena expansión, impulsado por factores tanto médicos como aspiracionales. Aunque el porcentaje de personas diagnosticadas con celiaquía en España se sitúa alrededor del 1% de la población, el consumo de productos sin gluten trasciende este grupo. Un creciente número de consumidores, motivados por intereses en salud, bienestar digestivo o alimentación “clean label”, incorpora productos libres de gluten en su dieta habitual, aumentando significativamente la demanda de alternativas en el mercado de bebidas y alimentos. En este contexto, el segmento de bebidas sin gluten ha experimentado un crecimiento notable a nivel mundial. El mercado global de bebidas sin gluten crece a un ritmo del 7,8% anual, con Europa posicionada como el principal mercado regional, debido a su nivel de concienciación y regulación en materia de seguridad alimentaria. Este crecimiento no solo se explica por factores médicos, sino por una mayor preocupación general por el etiquetado, la trazabilidad y los ingredientes naturales [\[26\]](#).

En España, el mercado de cervezas sin gluten ha sido abordado principalmente por grandes grupos cerveceros. Marcas como Estrella Galicia y Estrella Damm han desarrollado referencias sin gluten certificadas por la Federación de Asociaciones de Celíacos de España (FACE), convirtiéndose en opciones ampliamente disponibles en supermercados y establecimientos de hostelería. Sin embargo, el segmento artesanal aún no ha explotado su potencial: las cervezas sin gluten elaboradas por microcerveceras siguen siendo escasas y de distribución limitada. Esta falta de oferta especializada contrasta con la realidad del mercado: según un informe

de la Federación de Asociaciones de Celíacos de España, el 72% de los consumidores considera que la oferta de cervezas sin gluten en bares y restaurantes es insuficiente [27].

La importancia de la cerveza en la cultura gastronómica española refuerza aún más esta oportunidad. Según el Informe Socioeconómico del Sector de la Cerveza en España, el 78% de los españoles considera la cerveza como parte fundamental de la cultura gastronómica, especialmente en el aperitivo y el "tapeo". Además:

- 94,6% de los españoles disfruta de la cerveza durante el día.
- 90% de las veces la cerveza se acompaña con comida.
- Más de la mitad de los españoles consume cerveza en el aperitivo los fines de semana [28].

Este patrón de consumo indica que una cerveza artesanal sin gluten de calidad tiene un gran potencial de aceptación en el mercado, ya que se integraría fácilmente en los hábitos de consumo de los españoles, siempre que su precio y disponibilidad sean accesibles.

En conclusión, España presenta un escenario ideal para el crecimiento de la cerveza artesanal sin gluten. Con una demanda en aumento, una oferta aún en desarrollo y una percepción de escasez de opciones accesibles, la inversión en una planta de producción especializada no solo es viable, sino altamente estratégica.

3.3 Análisis regional: Sevilla como motor del auge cervecero artesanal en el sur de España

3.3.1 Posición de Sevilla en el consumo y ventas de cerveza

La provincia de Sevilla, con una población estimada de 1,94 millones de personas [29], cuenta con una amplia tradición cervecera. De acuerdo con datos del sector, la cerveza artesanal ha ido ganando terreno en el mercado, con una cifra de consumo en aumento cada año.

- El consumo medio de cerveza en España es de 56 litros per cápita al año. Sevilla, al igual que otras regiones, muestra un consumo significativo dentro de la península [30].
- Aproximadamente el 75% de la población consume cerveza regularmente, lo que en Sevilla equivale a 1,45 millones de personas. Esta cifra sitúa a la región en un nicho favorable para el consumo de cerveza, donde las marcas artesanales tienen espacio para seguir creciendo [31].

En 2023, la zona sur de España (que incluye a Andalucía, el sur de Extremadura, Ceuta y Melilla) fue la que mayor volumen de ventas de cerveza registró a nivel nacional, alcanzando los 9 millones de hectolitros, lo que representa el 23,3 % del total nacional. Este liderazgo en ventas refuerza la posición estratégica de Sevilla dentro del panorama cervecero español y su potencial como mercado clave para nuevas propuestas especializadas [32].

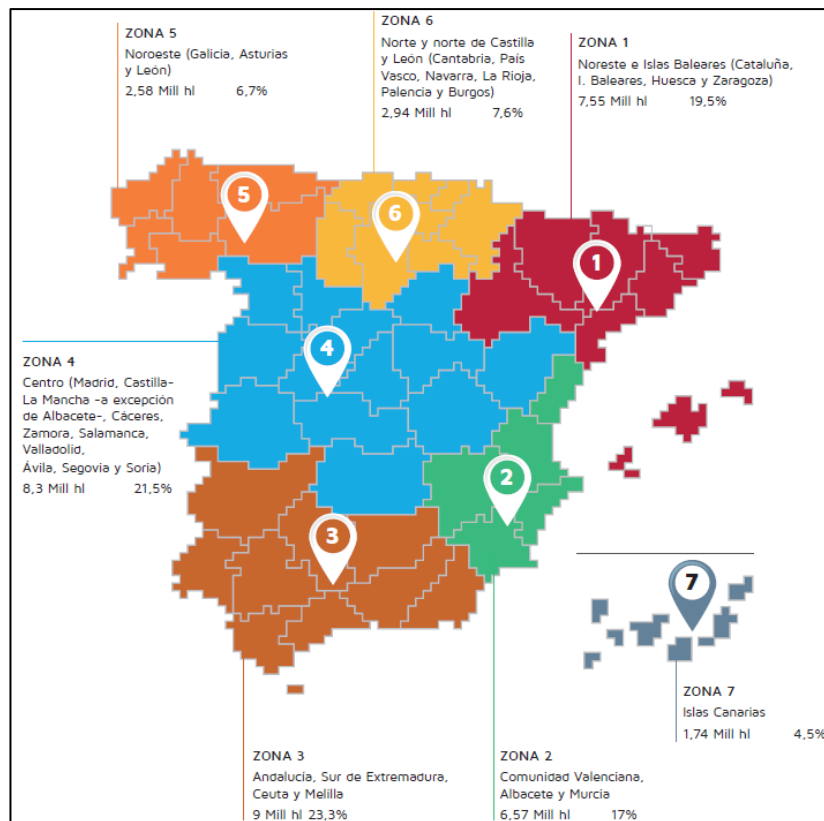


Figura 3-1. Ventas globales por zonas geográficas

3.3.2 Actores locales, competencia y perspectiva nacional

El mercado de la cerveza artesanal en Sevilla se encuentra en plena expansión, en consonancia con la tendencia nacional de crecimiento del sector, como se refleja en los datos de consumo y ventas analizados previamente.

Actualmente, en la provincia de Sevilla operan al menos ocho marcas activas de cerveza artesanal, como se observa en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Marcas de cervezas artesanales sevillanas [33]

Marca	Fundación	Localidad	Observación
Río Azul	2017	Hytasa	Zona bar para degustación
Desiderata	2014	Mairena del Aljarafe	Exporta a países como Francia o Holanda
Mond	2013	San José de la Rinconada	Mejor cerveza del mundo en su categoría (ITQI)
Vandalia	2013	Utrera	De las primeras artesanales lanzadas
Insitu	2016	Sanlúcar la Mayor	Cuenta con 8 variedades diferentes
Guadalquibeer	2018	Valencina de la Concepción	Receta elaborada en Cádiz
8 huellas	2014	Los palacios y Villafranca	Zona bar para degustación
Cárdenas	2014	Dos Hermanas	Cuenta con 3 variedades diferentes

A estas fábricas se suman al menos cinco cerveceras nómadas, es decir, marcas que diseñan sus propias recetas, pero elaboran en instalaciones de terceros. Entre ellas se encuentran Hecatombe (Mairena del Aljarafe), Morgual (Espartinas), La Bamba Craftbeer (Alcalá de Guadaira), Pergara (Cazalla de la Sierra) y Tedeska (Sevilla).

En total, Andalucía forma parte del mapa nacional de producción artesanal, que en 2020 registró 420 fábricas con producción activa en toda España, según el Registro General Sanitario de Empresas Alimentarias y Alimentos (RGSEAA).



Figura 3-2. Fábricas en España

Se reconoce que Andalucía destaca por su dinamismo cervecero, con provincias como Málaga, Sevilla, Granada y Cádiz a la cabeza del movimiento artesanal en la región [\[32\]](#). Este dato se visualiza en la Figura 3-3, que muestra el porcentaje de cerveceras artesanales por comunidad autónoma en España.

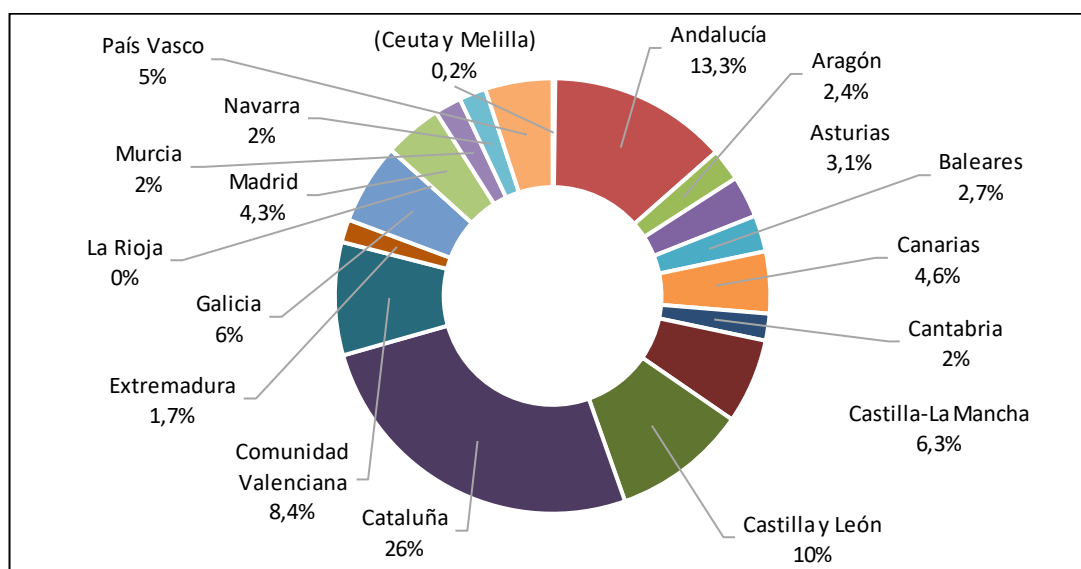


Figura 3-3. Repartición a lo largo del territorio de las 420 cerveceras activas, divididas en comunidades

autónomas

Por otra parte, cabe señalar que el sector cervecero español ha mostrado un compromiso creciente con la sostenibilidad ambiental. Desde 2019, las principales asociaciones del sector han trabajado bajo una memoria común de sostenibilidad, estructurada en torno a cinco ejes: circularidad del envase, eficiencia energética, reducción de la huella de carbono, eficiencia hídrica e innovación medioambiental.

3.1 Análisis FODA del mercado de cerveza artesanal sin gluten

Con el fin de evaluar la viabilidad estratégica de introducir una cerveza artesanal sin gluten en el mercado sevillano, se ha realizado un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas). Esta herramienta permite identificar los factores internos y externos que pueden influir en el desarrollo del proyecto, ayudando a definir una propuesta competitiva que responda a las demandas del mercado.

Tabla 3-2. Análisis FODA

Fortalezas	Oportunidades
Baja competencia directa en cerveza sin gluten	Mercado en expansión
Consumo cervecero alto en Sevilla y España	Creciente turismo gastronómico y enfoque saludable
Cultura cervecera muy arraigada	Posicionamiento como marca local referente sin gluten
Debilidades	Amenazas
Coste de producción más alto	Percepción de precios elevados por parte del consumidor
Dificultad inicial en distribución	Entrada de grandes marcas al segmento artesanal
Educación del consumidor sobre el producto	Dificultades logísticas para certificar “sin gluten”

4 MEMORIA DESCRIPTIVA

4.1. Etapas del proceso de fabricación

Cada fábrica de cerveza posee sus propios métodos de producción, técnicas específicas y equipos adaptados al tipo de cerveza que desea elaborar, así como a la cantidad de producto requerida. Sin embargo, a pesar de estas particularidades, todas ellas comparten un esquema común de fabricación, estructurado en cinco grandes bloques que definen el proceso cervecero:

- Malteado
- Elaboración del mosto
- Fermentación y maduración
- Filtración
- Carbonatación, estabilización y envasado

Este esquema general se mantiene incluso en aquellas instalaciones dedicadas a la producción artesanal, aunque con ciertas variaciones en función del grado de automatización, la mano de obra disponible o la receta de cada cerveza. En el caso específico del presente proyecto, centrado en una planta de producción artesanal de cerveza sin gluten, dichas etapas deben ser adaptadas para garantizar un producto final libre de esta proteína.

A continuación, se describen de manera sintética las principales fases del proceso de elaboración cervecera, que se mantienen vigentes también en la producción sin gluten:

1. Recepción, selección y acondicionamiento del grano.
2. Almacenaje en silos y posterior molturación, con el objetivo de obtener una harina adecuada para la extracción de los compuestos fermentables.
3. Infusión o maceración de la molienda en agua caliente, permitiendo la activación enzimática y la generación de azúcares fermentables.
4. Separación del mosto del residuo sólido o bagazo, que contiene las fracciones insolubles del grano.
5. Ebullición del mosto junto con lúpulo y posibles adjuntos no macerables, con el fin de desarrollar el perfil aromático, estabilizar microbiológicamente la mezcla y favorecer ciertas reacciones bioquímicas.
6. Clarificación del mosto mediante el uso de un remolino o Whirlpool, que facilita la decantación de proteínas y partículas en suspensión.
7. Descenso de temperatura hasta el nivel óptimo para la inoculación de levaduras, acompañado de una aireación controlada que favorece el inicio de la fermentación.
8. Fermentación alcohólica, etapa en la que las levaduras transforman los azúcares en alcohol y dióxido de carbono; en esta etapa se añade la enzima que degrada el gluten.
9. Maduración del producto a baja temperatura, permitiendo la sedimentación de residuos y el afinamiento de las características organolépticas.
10. Filtrado final y gasificación, proceso que ajusta la claridad y la carbonatación del producto, cuando corresponde.
11. Embotellado o envasado y posterior distribución, garantizando la conservación y estabilidad de la cerveza hasta su consumo.

4.1.1 Malteado de la cebada

El malteado de la cebada es un proceso esencial en la elaboración de productos como la cerveza, ya que es a

través de este proceso que se transforma el grano crudo en malta, la cual contiene los azúcares fermentables necesarios para la acción de la levadura. Este proceso consta de varias etapas: recepción y limpieza del grano, remojo, germinación y secado o tostado [13].

4.1.1.1 Recepción, limpieza y almacenamiento del grano

El proceso comienza con la recepción del grano, que generalmente es cebada por su alto contenido enzimático y su adecuada estructura para la maltería. La cebada se somete a un control de calidad inicial que incluye la evaluación del contenido de humedad, el nivel de proteína, la capacidad germinativa y la pureza del grano. Posteriormente, se limpia para eliminar impurezas como polvo, piedras y semillas extrañas. El grano se almacena en silos bajo condiciones controladas de humedad (alrededor del 15-16 %) y temperatura, lo que evita el desarrollo de hongos y mantiene su viabilidad germinativa.

4.1.1.2 Remojo

El remojo tiene como objetivo incrementar la humedad del grano hasta un nivel óptimo para iniciar la germinación, generalmente entre el 42 % y el 45 %. Este proceso puede realizarse por inmersión directa del grano en agua o por aspersión intermitente, siempre acompañados de una adecuada aireación para facilitar la respiración del grano y evitar la acumulación de CO₂. La duración del remojo suele oscilar entre 40 y 60 horas, y durante este periodo se eliminan sustancias indeseadas de la superficie del grano, como polifenoles y microorganismos.

4.1.1.3 Germinación

La germinación es la etapa en la que el embrión del grano comienza a desarrollarse, y se activan y producen las enzimas necesarias para la conversión posterior del almidón. En esta fase, el grano sufre transformaciones bioquímicas internas: se activan enzimas como la amilasa, la proteasa y la beta-glucanasa, que preparan los componentes estructurales y de reserva del grano para su utilización en el proceso cervecero.

Además, el embrión inicia su metabolismo y comienza a respirar, consumiendo oxígeno y generando dióxido de carbono (CO₂) como parte del proceso de respiración celular aeróbica. Esta oxidación de los azúcares producidos a partir del almidón puede representarse con la siguiente ecuación:



El proceso de germinación dura entre 4 y 6 días, y requiere condiciones ambientales controladas, especialmente en términos de temperatura (entre 12 °C y 18 °C) y humedad relativa.

4.1.1.4 Secado y tostado

Una vez que se han generado las enzimas deseadas, es necesario detener el proceso de germinación para evitar que el grano consuma los azúcares que se producirán más adelante. Para ello, se realiza el secado, también llamado horneado, que reduce progresivamente la humedad del grano hasta niveles que aseguren su conservación (generalmente entre el 8 y el 10 %).

El secado se lleva a cabo en dos fases: una primera etapa a baja temperatura, que busca preservar la actividad enzimática, y una segunda a temperaturas más altas, que permite el desarrollo de compuestos de color y aroma característicos, especialmente en maltas especiales o tostadas. La intensidad del tostado determinará el tipo de malta obtenida y, por ende, el perfil de la cerveza final.



Figura 4-1. Tipos de malta

Aunque el malteado es una fase fundamental dentro del proceso cervecero, en la presente planta de producción no se realiza este proceso de forma interna, ya que se adquiere la malta ya elaborada a través de proveedores especializados. En el contexto artesanal español, destaca la maltería Grannaria, ubicada en León, que utiliza métodos tradicionales como la germinación en suelo y el horneado con fuego directo de distintas maderas, lo cual confiere matices únicos al producto final. Asimismo, es habitual el uso de maltas importadas, como las ofrecidas por el grupo SlowBeer, distribuidor oficial en España de la maltería The Swaen, con sede en los Países Bajos. Gracias a estas opciones, la planta puede disponer de una amplia variedad de maltas, adaptadas a los distintos estilos de cerveza sin necesidad de realizar el malteado in situ.

Por tanto, el proceso productivo en esta planta comienza directamente con la molienda de la malta recibida, la cual ya ha sido cribada y acondicionada para su uso inmediato.

4.1.2 Elaboración del mosto

La elaboración del mosto cervecero comienza tras la recepción y almacenamiento de la malta, la cual se guarda habitualmente en silos de acero inoxidable o de hormigón con paredes lisas y fondo cónico. Estos silos están diseñados para evitar acumulaciones de residuos y minimizar riesgos de contaminación. Además, están equipados con sistemas de ventilación, termosensores para detectar variaciones de temperatura y dispositivos de desinfección, con el objetivo de mantener la calidad de la materia prima y prevenir el desarrollo de microorganismos no deseados. Antes de su uso, la malta se limpia mediante ciclones y filtros que eliminan polvo y cuerpos extraños.

Una vez asegurada la calidad de la malta, el proceso de obtención del mosto se divide en varias etapas: molturación, maceración, filtración, cocción, clarificación y enfriamiento.

4.1.2.1 Molturación

La molturación permite desintegrar el grano de malta para liberar los componentes internos del endospermo, como enzimas, almidones y proteínas, esenciales para la transformación de los azúcares durante la maceración. Este proceso debe realizarse con precisión, buscando un equilibrio entre la ruptura del interior del grano y la conservación de la cascarilla. Si la molienda es demasiado fina, se genera una harina compacta que dificulta el paso del mosto al formar un lecho filtrante poco permeable. En cambio, una molienda muy gruesa puede reducir el rendimiento de extracción, dejando almidones sin disolver. La cascarilla debe mantenerse lo más íntegra posible, ya que actúa como un filtro natural durante la separación del mosto y evita la liberación de sustancias indeseables.

El sistema más común en la industria cervecera es la molturación en seco, y para muchas cerveceras, especialmente en producciones medianas o artesanales, se emplea un molino de dos rodillos. Este tipo de molino consiste en dos cilindros que giran en sentido contrario, entre los cuales pasa el grano. La distancia entre los rodillos se ajusta para controlar el grado de molienda, lo que permite obtener una mezcla de partículas que incluye una proporción adecuada de harina, sémola y cascarilla. A medida que la malta pasa por el molino, el endospermo se tritura mientras que la cascarilla, al ser más elástica, tiende a romperse en fragmentos más grandes, favoreciendo así la función filtrante. Para asegurar un funcionamiento eficiente, la malta debe estar completamente seca antes de ser molturada, ya que la humedad puede hacer que el grano se adhiera a los rodillos y entorpezca el proceso.

En términos de resultado, la molienda en seco con molino de dos rodillos produce una mezcla en la que predominan partículas de sémola fina y gruesa, con un contenido moderado de harina. Aunque esta configuración no incluye un sistema de tamizado intermedio como ocurre con los molinos de tres rodillos, permite un control adecuado del tamaño de las partículas mediante la correcta regulación de la separación entre los rodillos y el ajuste del caudal de alimentación.

Como alternativa, existe la molturación en húmedo, en la que se humedece la malta antes de su paso por los rodillos, lo que hace que la cáscara sea más flexible y resistente a la rotura, mientras que el endospermo sigue siendo triturable. Aunque esta técnica mejora la integridad de la cascarilla y puede ofrecer un rendimiento ligeramente superior, requiere una instalación más compleja y un mayor control sobre la humedad, lo que la hace menos habitual en pequeñas instalaciones.

4.1.2.2 Maceración

Durante esta etapa, las harinas y sémolas obtenidas se mezclan con agua caliente en condiciones controladas de temperatura y pH. El objetivo es activar las enzimas propias del grano para convertir el almidón en azúcares fermentables y solubilizar otras sustancias como proteínas, vitaminas y minerales.

La eficiencia de esta conversión enzimática depende principalmente de la temperatura de la mezcla, ya que diferentes enzimas actúan de manera óptima en distintos rangos térmicos. Las más importantes son la beta-amilasa, que actúa preferentemente entre 60 y 65 °C generando azúcares fermentables, y la alfa-amilasa, activa entre 68,5 y 70 °C, responsable de producir dextrinas, que no fermentan, pero aportan cuerpo y dulzor a la cerveza. En la práctica, muchos cerveceros optan por un único escalón térmico de maceración, por ejemplo, a 67 °C durante aproximadamente 60 minutos, ya que en ese punto se logra un buen equilibrio entre ambas actividades enzimáticas.

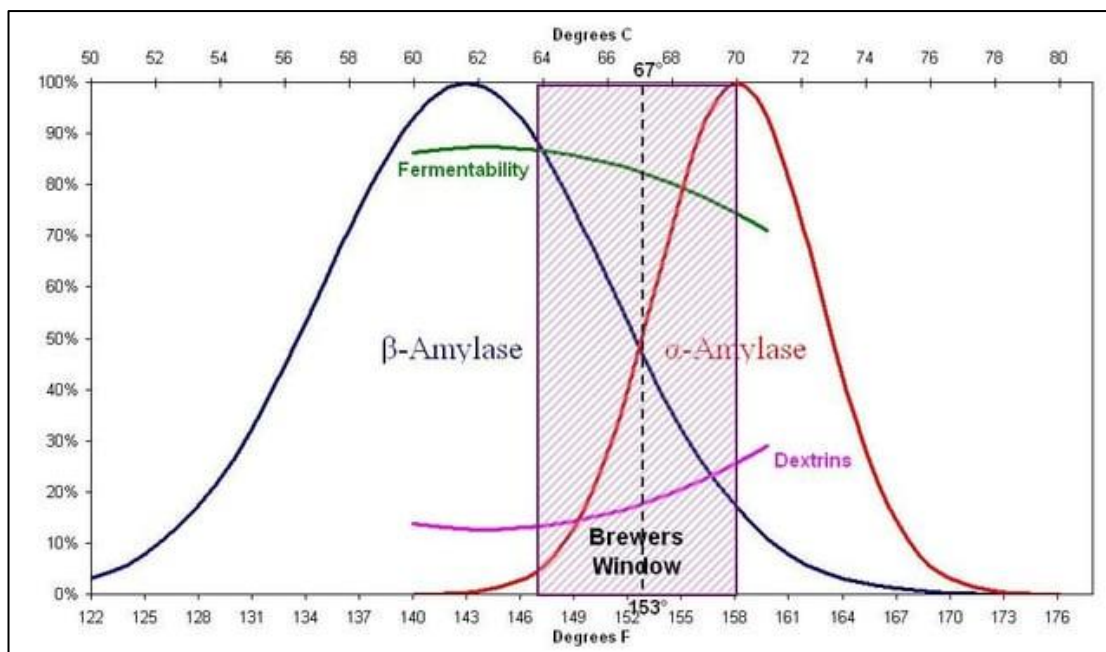


Figura 4-2. Actividad enzimática en un macerado de una hora

Existen dos métodos principales de maceración: por infusión y por decocción. La infusión simple consiste en calentar gradualmente la mezcla en un solo recipiente, denominado caldera de empaste, hasta alcanzar y mantener la temperatura deseada. Es el método más común en la elaboración de cerveza artesanal, especialmente por su simplicidad y control. La decocción, en cambio, implica retirar una parte del macerado, hervirla en una caldera separada y volver a añadirla al recipiente principal para incrementar escalonadamente la temperatura. Este método tradicional es más complejo, pero intensifica el perfil de sabor y color de la cerveza.

Tras finalizar la conversión de los almidones, se puede realizar un paso llamado “mash out”, que consiste en elevar la temperatura del macerado hasta unos 78 °C. Esta elevación térmica detiene por completo la actividad enzimática y disminuye la viscosidad del mosto, facilitando su separación del residuo sólido o bagazo en la siguiente etapa del proceso. El líquido resultante, conocido como mosto dulce, contiene todos los azúcares fermentables y compuestos solubles extraídos de la malta, y su calidad determinará en gran medida las características sensoriales y el contenido alcohólico de la cerveza final.

4.1.2.3 Filtración

Tras la maceración, la mezcla obtenida (compuesta por el mosto dulce y los residuos sólidos del grano) debe someterse a un proceso de separación sólido-líquido conocido como filtración. Esta etapa es crucial para extraer el mosto limpio, rico en azúcares fermentables, y eliminar casi por completo las partículas sólidas que podrían aportar sabores astringentes o indeseados durante la cocción posterior. La eficiencia de este proceso depende en gran medida del estado de la cascarilla del grano, que actúa como un lecho natural de filtrado: cuanto más entera permanezca durante la molturación, mejor cumplirá su función como medio retenedor de harinas y otras impurezas.

En función del tipo de molienda y del diseño de la planta, pueden emplearse distintos sistemas de filtración, siendo los más comunes la cuba filtro y el filtro prensa. La cuba filtro es un recipiente que permite realizar tanto la maceración como el filtrado en el mismo tanque, mediante un fondo falso y un sistema de paletas motorizadas que rascan el bagazo acumulado para favorecer su drenaje. Requiere de un grado de molienda media, ofrece una filtración de velocidad moderada (alrededor de 3 horas), y produce un mosto de buena claridad.

Por otro lado, el filtro prensa es un equipo separado, más compacto y tecnológicamente avanzado, que permite trabajar con una molienda más fina gracias a su sistema de placas filtrantes. Su funcionamiento es más rápido (1,5 a 2,5 horas), facilita la automatización del proceso y su limpieza es más sencilla. Aunque la claridad del mosto puede ser inicialmente menor, esta se corrige en etapas posteriores del proceso cervecero. Por su eficiencia y compatibilidad con producciones más intensivas, los filtros prensa son ampliamente utilizados en instalaciones modernas.

Debido a sus valiosos ingredientes, el bagazo se considera buen alimento para los animales. Su composición se muestra en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Composición del bagazo seco.

Proteína	28 %
Grasas	8,2 %
Extracto libre de nitrógeno	41%
Celulosa	17,5 %
Minerales	5,3 %

4.1.2.4 Cocción del mosto

Durante esta etapa, el mosto filtrado se traslada a una caldera donde se somete a ebullición durante aproximadamente 60 a 90 minutos, normalmente a presión atmosférica, aunque existen sistemas que permiten alcanzar temperaturas superiores (hasta 140 °C) mediante presión positiva y calentamiento indirecto con vapor. La cocción cumple diversas funciones fundamentales: en primer lugar, detiene toda actividad enzimática residual y estabiliza el perfil químico del mosto. También permite la esterilización térmica, eliminando microorganismos indeseables, y favorece la coagulación y precipitación de proteínas y otras sustancias coloidales, especialmente en presencia de taninos, iones metálicos y fosfato cálcico, contribuyendo a la clarificación y estabilidad de la futura cerveza.

Durante la ebullición se evaporan compuestos volátiles no deseados como el dimetilsulfuro (DMS), responsable de aromas vegetales indeseables, y se produce una concentración del extracto por pérdida de agua, aumentando la densidad del mosto. En condiciones normales de presión, esta evaporación representa una pérdida de volumen de entre un 10 % y un 15 %, un factor importante a considerar en los balances de materia. Asimismo, ocurren reacciones químicas como la caramelización parcial de azúcares, la oxidación de polifenoles y la formación de melanoidinas, que influyen directamente en el color y aroma del producto final.

La adición de lúpulo durante la cocción es crítica para definir el perfil sensorial de la cerveza. Si se añade al comienzo de la ebullición, sus ácidos alfa se isomerizan, generando amargor. Si se añade en los últimos 15-20 minutos, se conservan más compuestos responsables del sabor, y si se incorpora en los últimos 5 minutos o incluso después del hervor (como en el dry hopping), se potencian los aromas sin aumentar el amargor. El lúpulo puede encontrarse en distintas formas: conos, pellets o extractos concentrados, y su selección depende de sus propiedades organolépticas y del estilo de cerveza buscado.

En esta fase también se pueden incorporar adjuntos no fermentables como jarabes de maíz, azúcares o extractos de cereales, los cuales permiten ajustar la densidad del mosto, reducir costes y modificar el perfil de nitrógeno, lo que se traduce en una cerveza de cuerpo más ligero y aroma más limpio. La cocción es uno de los procesos más intensivos en energía dentro de la planta cervecera.

4.1.2.5 Clarificación, enfriamiento y aireación

Finalizada la cocción, el mosto caliente contiene proteínas coaguladas, restos de lúpulo y otras partículas

suspendidas que deben eliminarse antes de continuar con la fermentación. Este proceso de clarificación se puede realizar mediante un tanque de sedimentación o, más comúnmente en la actualidad, mediante un sistema de centrifugado conocido como “Whirlpool”.

El tanque Whirlpool es un recipiente de base cónica y acero inoxidable, diseñado para aprovechar la fuerza centrífuga generada al introducir el mosto tangencialmente. Esta circulación provoca que las partículas sólidas se concentren en el centro de la base del tanque, formando una especie de cono compacto conocido como “trub” o “turbio caliente”. La clarificación se produce en un período de 20 a 30 minutos, tras el cual se extrae el mosto limpio desde la parte superior o lateral del tanque.

Una vez clarificado, el mosto debe enfriarse rápidamente hasta alcanzar la temperatura de siembra de la levadura (generalmente entre 7 y 10 °C). Para ello, se emplean intercambiadores de calor, siendo el más común el intercambiador de placas, compuesto por una serie de láminas de acero inoxidable que crean cavidades alternas para el paso del mosto y del refrigerante (normalmente agua fría). Este sistema permite reducir la temperatura del mosto de unos 98-95 °C a unos 6-8 °C de forma higiénica, eficiente y compacta. El agua utilizada en el enfriamiento puede alcanzar temperaturas de salida de 80 a 88 °C y, en muchas cerveceras, se reutiliza como agua de maceración para mejorar la eficiencia térmica del proceso.

Durante el enfriamiento también se realiza la aireación controlada del mosto, que es esencial para el adecuado desarrollo de la levadura durante la fermentación alcohólica. El oxígeno disuelto permite a las células sintetizar lípidos y esteroides necesarios para mantener la integridad de su membrana durante la replicación celular. Para procesos de fermentación acelerada en tanques cilíndrico-cónicos (TCC) basta con 4,5-6 mg O₂/L.

4.1.3 Fermentación y maduración

Una vez finalizado el proceso de cocción y posterior enfriado del mosto, este se transfiere al fermentador asegurando que todas las superficies en contacto estén debidamente esterilizadas, ya que la contaminación en este punto comprometería el desarrollo adecuado de la fermentación. Antes del llenado, se comprueba que el mosto ha alcanzado la temperatura óptima para la cepa de levadura seleccionada, lo cual es esencial para garantizar una fermentación saludable. En el caso de cervezas tipo Ale, esta temperatura se sitúa habitualmente entre 15 y 24 °C, mientras que para cervezas Lager se mantiene entre 7 y 13 °C. El control de la temperatura en esta etapa es crucial, ya que influye directamente en la actividad metabólica de la levadura.

En este momento se lleva a cabo la inoculación de la levadura, previamente propagada en condiciones estériles para alcanzar una biomasa viable y activa. La levadura seleccionada se incorpora directamente al mosto mediante un sistema de dosificación controlado, que garantiza una incorporación adecuada y homogénea. Para un mosto completo, se considera necesaria una dosificación de entre 15 y 30 millones de células de levadura / ml de mosto, lo cual se consigue habitualmente mediante la adición de 0,5-1 litro de levadura espesa / hl de mosto. Esta dosificación permite optimizar la velocidad y calidad del proceso fermentativo. De forma simultánea o justo después de esta inoculación, se añade también una enzima específica degradadora del gluten, habitualmente una prolyl endopeptidasa (normalmente en una dosis de 2,5 mg/L) [34]. Esta enzima actúa sobre las secuencias de prolina y glutamina características del gluten presente en el mosto, rompiendo sus enlaces peptídicos y reduciendo la fracción inmunogénica del gluten a niveles no detectables para personas celíacas. Su incorporación temprana, junto a la levadura, permite que actúe durante toda la fermentación primaria, aprovechando las condiciones de temperatura y pH del medio para maximizar su eficacia.

Durante la fermentación, la levadura transforma los azúcares fermentables presentes en el mosto, principalmente glucosa, maltosa y maltotriosa, en etanol y dióxido de carbono según la reacción:



Este proceso es exotérmico, por lo que genera una cantidad considerable de calor. Para evitar un sobrecalentamiento que pueda alterar la cinética fermentativa o inducir la formación de compuestos indeseables como alcoholes superiores y ésteres no deseados, se implementa un sistema de refrigeración automatizado que mantiene constante la temperatura dentro del fermentador.

Una vez que la fermentación primaria ha concluido, lo cual ocurre habitualmente entre cuatro y siete días después de la inoculación, se reduce progresivamente la temperatura en el fermentador hasta situarla cerca de los 0-1 °C, dando inicio al proceso de maduración o guarda. Durante esta fase, de duración variable según el estilo de cerveza, se produce la clarificación natural por decantación de levaduras y proteínas, la estabilización microbiológica y la mejora del perfil organoléptico mediante la reducción de compuestos como el diacetilo, el acetaldehído y algunos alcoholes fusel. La maduración también permite que el dióxido de carbono disuelto alcance su equilibrio, facilitando una carbonatación natural que contribuye a la textura final del producto.

En el caso concreto de una cerveza sin gluten elaborada a partir de cebada, esta fase final de maduración es especialmente relevante, ya que permite completar la acción de la enzima degradadora del gluten introducida durante la inoculación. A lo largo de la fermentación y la guarda, esta enzima actúa sobre los péptidos residuales, asegurando que el contenido final de gluten sea inferior a 20 ppm, umbral considerado seguro según la normativa europea vigente para productos etiquetados como “sin gluten”. Además, al tratarse de un proceso enzimático controlado, no se producen efectos negativos sobre el sabor, el cuerpo ni el aspecto de la cerveza.

Todo el proceso se realiza habitualmente en tanques cilíndricos de acero inoxidable, que permiten una fermentación eficiente, recolección de levadura, y una transición directa hacia la maduración sin necesidad de trasiegos intermedios, lo cual reduce el riesgo de contaminación.

4.1.4 Filtración

Tras la etapa de maduración, en la que la cerveza evoluciona tanto desde el punto de vista organoléptico como fisicoquímico, puede aplicarse un proceso de filtración con el objetivo de mejorar su limpidez y estabilidad microbiológica. Sin embargo, la filtración representa un punto de debate fundamental dentro de la elaboración artesanal, ya que, si bien permite obtener una cerveza visualmente más atractiva y con mayor vida útil, también puede eliminar compuestos que aportan sabor, aroma y cuerpo.

Desde un punto de vista técnico, la filtración consiste en la separación mecánica de partículas en suspensión, como levaduras residuales, proteínas, polifenoles y otras sustancias coloidales. Este proceso puede realizarse mediante distintos sistemas: filtros de placas, filtros de tierras diatomeas o incluso mediante filtración tangencial. En la Figura 4-3 se observan las distintas tecnologías de filtración existentes.

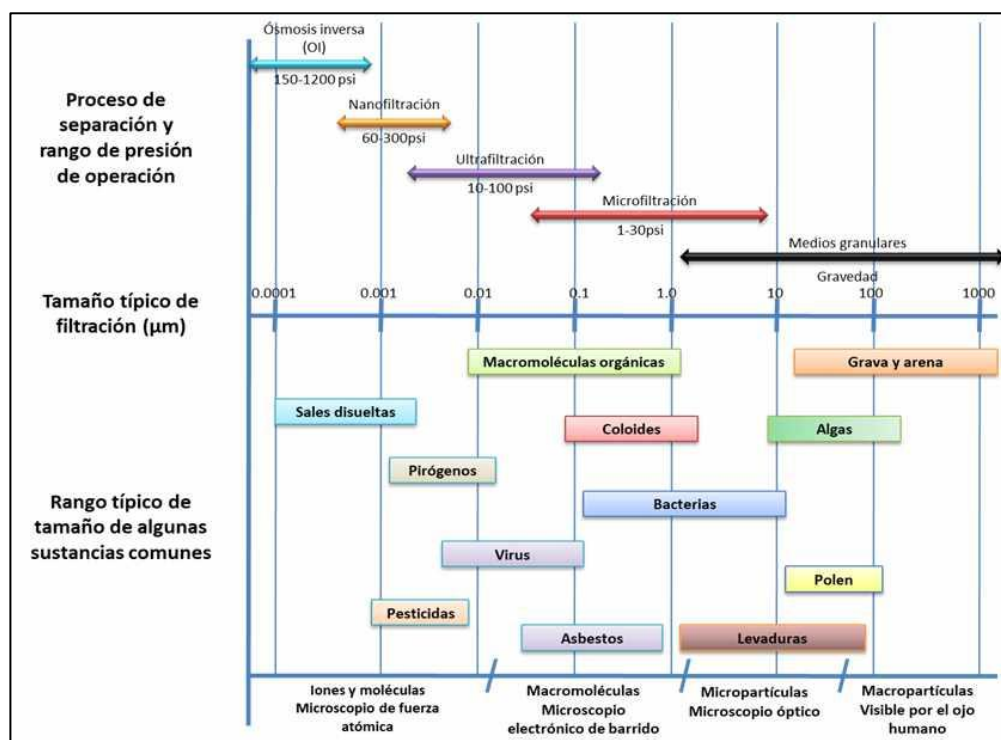


Figura 4-3. Comparación de procesos de filtración y rangos de tamaño de partículas que retienen

No obstante, en el ámbito artesanal, se prefiere evitar la filtración agresiva y se optan por métodos alternativos de clarificación, como la sedimentación por gravedad a bajas temperaturas (entre 0 y 2 °C), el uso de coadyuvantes naturales como la bentonita [35], o incluso la centrifugación suave. Estas técnicas, aunque son menos eficaces a nivel industrial, permiten conservar la levadura viva y otros componentes que forman parte del carácter propio de la cerveza artesanal. Además, en algunos casos se recurre a una clarificación parcial, lo que permite alcanzar un equilibrio entre estética visual y la calidad del sabor y aroma. En todo caso, el objetivo en la elaboración artesanal no es lograr una cerveza perfectamente transparente, sino ofrecer un producto auténtico y con personalidad.

4.1.5 Carbonatación, estabilización y envasado

Aunque estas etapas no se incluyen en el balance de materia y energía desarrollado en este trabajo, se describen a continuación por su importancia técnica dentro del proceso cervecero completo. El balance se considera hasta el almacenamiento posterior a la filtración, por lo que las operaciones que siguen tienen únicamente un carácter descriptivo.

La carbonatación influye directamente en la percepción del cuerpo, la efervescencia, la formación de espuma y la liberación de aromas volátiles. Puede realizarse de forma natural, mediante una fermentación secundaria en tanque o en botella, en la que la levadura consume azúcares residuales y genera CO₂ de forma progresiva y homogénea. Este método, aunque más lento, mantiene la integridad del producto y evita la adición de gases externos. En contraste, la carbonatación forzada introduce CO₂ a presión en tanques cerrados, permitiendo un control más rápido y preciso del gas disuelto.

El contenido final de dióxido de carbono depende del estilo cervecero. Por ejemplo, una Lager europea suele contener entre 4,3 y 5,3 g/L [36], mientras que una cerveza de trigo alemana puede alcanzar hasta 8,8 g/L.

Por su parte, la estabilización es el conjunto de técnicas destinadas a mantener la cerveza en condiciones óptimas a lo largo del tiempo, evitando la aparición de turbidez, sedimentos o desviaciones en el sabor. Entre ellas se incluyen el almacenamiento prolongado en frío, que favorece la precipitación natural de proteínas y levaduras residuales; la maduración en tanques cerrados, que permite la autodepuración del líquido; y la decantación por gravedad o mediante sistemas de recirculación suave. Estos procesos, combinados con una buena higiene y control de oxígeno disuelto, minimizan la necesidad de estabilizantes químicos.

Finalmente, el envasado es la última etapa del proceso cervecero, y su correcta ejecución es clave para preservar la calidad del producto. Las opciones más comunes incluyen:

- Barriles: Utilizados sobre todo en hostelería, permiten mantener la cerveza presurizada y fresca durante su servicio. Se llenan a contrapresión para evitar la oxidación y conservar el CO₂ disuelto. Son reutilizables y presentan una buena eficiencia logística en circuitos cortos.
- Botellas de vidrio: Muy comunes en la distribución artesanal, permiten una buena conservación del producto, especialmente si se utilizan botellas oscuras que protejan de la luz. Las botellas retornables son sostenibles, pero requieren procesos estrictos de limpieza e inspección para evitar contaminaciones cruzadas.
- Latas: Aunque tradicionalmente asociadas a la cerveza industrial, las latas de aluminio están ganando terreno en el sector artesanal por su excelente capacidad de bloqueo de la luz, menor peso y eficiencia térmica. Su principal inconveniente es el mayor coste inicial y la necesidad de recubrimientos internos que eviten reacciones con el producto.

En todos los casos, el llenado se realiza mediante técnicas isobáricas para evitar la pérdida de gas y la entrada de oxígeno.

En la siguiente tabla se resumen las etapas mencionadas con anterioridad, incluyendo los datos principales de cada fase:

Tabla 4-2. Resumen de las etapas con datos principales

Etapa	Objetivo	Datos principales	Duración aproximada
Recepción y limpieza	Asegurar la calidad del grano	Humedad del 15-16 %, control de impurezas	Variable
Remojo	Activar la germinación aumentando la humedad del grano	Humedad final 42-45 %, aireación constante	40-60 horas
Germinación	Activación enzimática y transformación del almidón	Temp. 12-18 °C, humedad alta, buena ventilación	4-6 días
Secado y tostado	Detener germinación, conservar enzimas, generar color y aroma	Temp. según tipo de malta, humedad final 8-10 %	Variable
Molturación	Romper el grano sin dañar la cascarilla	Molienda en seco, molino de 2 rodillos, grano seco	30 minutos
Maceración	Convertir almidones en azúcares fermentables	Temp. 60-70 °C, pH controlado	60 minutos
Filtración	Separar mosto dulce del bagazo	Cuba filtro o filtro prensa, bagazo 70-80 % humedad	1,5-3 horas
Cocción del mosto	Esterilizar, evaporar compuestos volátiles, añadir lúpulo	Temp. hasta 140 °C si hay presión, hasta 100 °C a presión atmosférica, evaporación 10-15 %	60-90 minutos
Clarificación en caliente	Separar sólidos (lúpulo, proteínas coaguladas) del mosto caliente	Tanque whirlpool, entrada tangencial, formación de “trub”	20-30 minutos
Enfriamiento y aireación	Reducir temperatura y oxigenar mosto antes de fermentación	Intercambiador de placas, de 95-98 °C a 6-10 °C, oxígeno disuelto: 4,5-6 mg/L	30 minutos
Fermentación primaria	Convertir azúcares en etanol y CO ₂	Temp. Ale: 15-24 °C, Lager: 7-13 °C, enzima degradadora de gluten: 2,5 mg/L	4-7 días
Maduración (guarda)	Clarificación natural, estabilización y mejora del perfil sensorial	Temp. 0-1 °C, tanque cerrado, decantación por frío, finaliza acción enzimática sobre el gluten	1-4 semanas
Filtración	Mejorar claridad y estabilidad microbiológica	Filtros de placas o tierras, o métodos suaves, sedimentación a 0-2 °C	1-2 horas
Carbonatación, estabilización y envasado	Ajustar gas disuelto, estabilizar cerveza y conservarla para distribución	Carbonatación natural o forzada (4-8 g/L CO ₂), frío prolongado, higiene estricta, llenado isobárico en barril, botella o lata	Variable

4.2 Diagrama de bloques

Tras detallar las distintas etapas del proceso de elaboración de cerveza sin gluten, se presenta a continuación en la Figura 4-4 un diagrama de bloques que resume de forma clara y ordenada el flujo general del proceso. Esta representación visual permite identificar fácilmente las operaciones fundamentales y los puntos críticos que intervienen en la transformación de las materias primas en un producto final seguro y libre de gluten, facilitando así una comprensión global del procedimiento productivo.

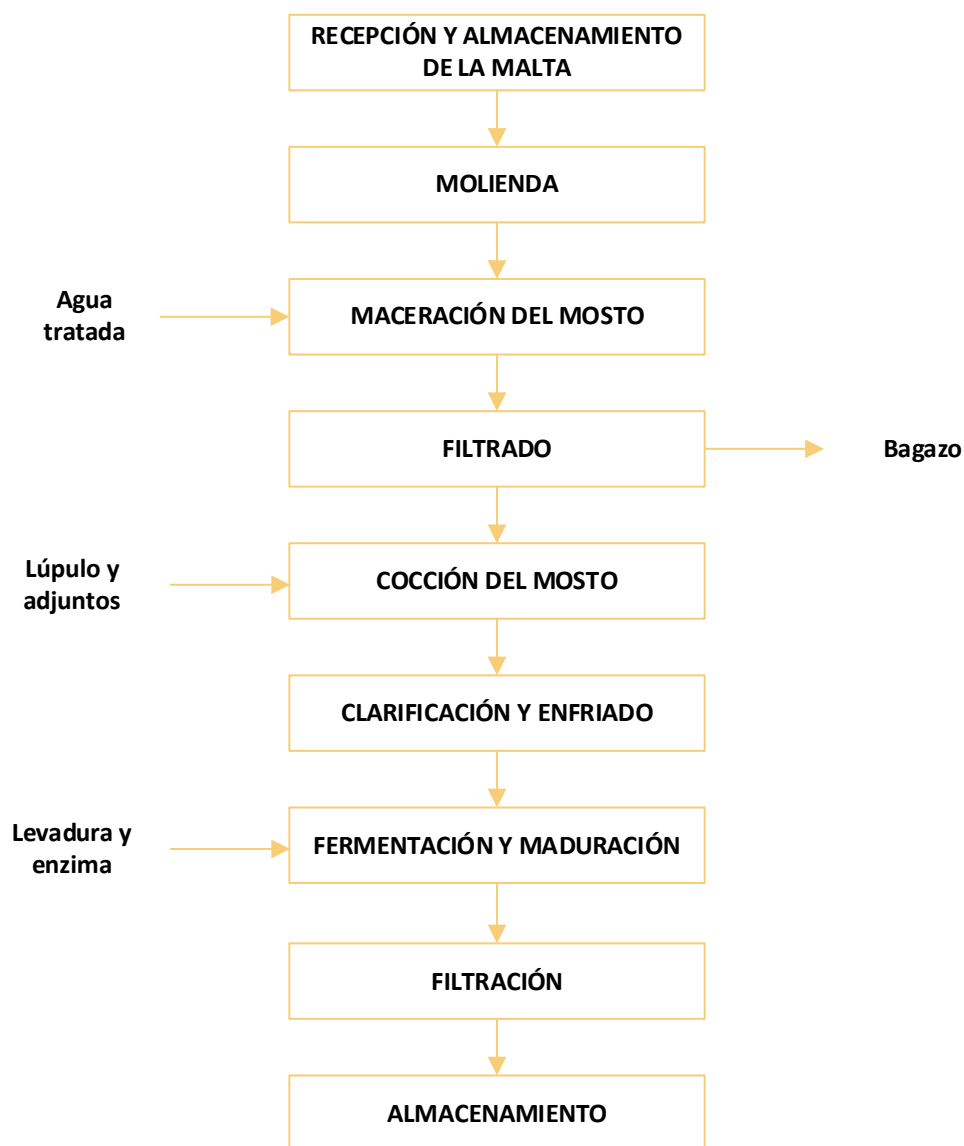


Figura 4-4. Diagrama de bloques del proceso

4.3 Maquinaria

La elaboración de cerveza sin gluten requiere el uso de equipos específicos que se adapten a las exigencias del proceso y aseguren la calidad del producto final. En este apartado se expone una selección de los equipos más representativos empleados durante la producción, con una descripción de sus funciones, características técnicas y su relevancia dentro del conjunto del proceso productivo.

Cabe destacar que la maquinaria utilizada en la industria alimentaria debe estar construida con materiales que no interfieran con las propiedades del producto, siendo el acero inoxidable la opción más común. Su resistencia a la corrosión, facilidad de limpieza y comportamiento higiénico lo convierten en el material ideal para el contacto directo con alimentos.

A continuación, se detallan los principales equipos de proceso involucrados en la producción de cerveza sin gluten.

4.3.1 Molino de rodillos

El molino de rodillos es un equipo fundamental en la etapa de molienda del grano malteado, diseñado para romper la estructura del grano y liberar el contenido del endospermo sin destruir la cáscara. Su funcionamiento se basa en la compresión controlada del producto entre dos o más rodillos metálicos dispuestos en paralelo y accionados por un sistema motorizado.

El modelo representado corresponde a un molino abierto, sin carcasa de protección, que permite observar directamente el funcionamiento del equipo. Está constituido por dos rodillos metálicos dispuestos en paralelo, accionados por un sistema motorizado. La superficie de los rodillos es estriada, lo que mejora el agarre del grano y facilita una tritución más eficiente y controlada.

El ajuste de la separación entre los rodillos es regulable, lo que permite controlar con precisión el tamaño de partícula del producto molido. Esta característica resulta especialmente importante en el caso de materias primas sin gluten, donde se requiere una molienda homogénea que favorezca la posterior extracción de compuestos solubles, sin dañar excesivamente las cáscaras que actúan como filtro natural en el proceso de maceración.

El equipo cuenta con un sistema de alimentación forzada mediante sinfín, que garantiza un suministro continuo y controlado del material. La descarga del producto se efectúa por gravedad, optimizando la eficiencia del proceso.



Figura 4-5. Molino de rodillos

4.3.2 Macerador

El macerador es un equipo fundamental en el proceso de elaboración de cerveza sin gluten, diseñado para la mezcla y extracción eficiente de azúcares fermentables a partir del grano molido. Este recipiente está construido en acero inoxidable de alta calidad, asegurando resistencia a la corrosión y facilidad de limpieza, aspectos

esenciales para mantener la higiene en la producción cervecera.

En este caso, se utiliza una sola paila de maceración, ya que el proceso se realiza mediante infusión simple, lo que permite efectuar la conversión de almidones en azúcares en un solo recipiente, sin necesidad de separar funciones como en sistemas de decocción o equipos multietapa.

El sistema de calentamiento del recipiente se realiza mediante vapor, lo que permite un control térmico eficiente y uniforme a lo largo del proceso. Este vapor se transfiere al contenido del tanque a través de una chaqueta térmica, manteniendo la temperatura óptima durante toda la maceración. La regulación de temperatura se logra con precisión mediante sensores térmicos y un controlador automático, garantizando la activación adecuada de las enzimas responsables de la conversión enzimática.

Además, el recipiente dispone de un sistema de agitación mecánica o recirculación para asegurar una mezcla homogénea del mosto, evitando la formación de grumos y favoreciendo una extracción uniforme. La capacidad del recipiente está diseñada acorde a la escala de producción, optimizando el rendimiento y la calidad del mosto final.

Finalmente, el recipiente de maceración incluye válvulas de descarga que permiten transferir el mosto hacia el filtro prensa, donde se realiza la separación eficiente del bagazo. Este diseño asegura un proceso limpio y continuo para avanzar hacia las etapas siguientes del proceso cervecero.



Figura 4-6. Recipiente de maceración

4.3.3 Filtro prensa

El filtro prensa es un equipo complementario clave en el proceso de elaboración de cerveza sin gluten, especialmente diseñado para optimizar la separación del mosto y el bagazo tras la maceración.

Está compuesto por una serie de placas filtrantes dispuestas en paralelo, entre las cuales se alojan telas filtrantes de grado alimentario. El mosto caliente se bombea a presión a través del sistema, reteniendo los sólidos (bagazo) en las cámaras del filtro mientras el líquido clarificado se recolecta para su posterior hervor.

El uso del filtro prensa permite una separación más precisa y rápida que los falsos fondos tradicionales, reduciendo tiempos de operación, mejorando el rendimiento de extracción y obteniendo un mosto más limpio. Además, facilita el manejo del bagazo, que puede ser retirado de forma mecánica y eficiente al finalizar el ciclo de filtración.



Figura 4-7. Filtro prensa

4.3.4 Hervidor con sistema Whirlpool

El hervidor es el equipo donde se lleva a cabo la ebullición del mosto, una etapa esencial en el proceso cervecero que cumple múltiples funciones: esterilización del mosto, inactivación enzimática, extracción y transformación de los compuestos del lúpulo, y evaporación de compuestos volátiles no deseados como el DMS (dimetilsulfuro).

Este recipiente está fabricado en acero inoxidable de grado alimentario y cuenta con un sistema de calentamiento mediante chaqueta térmica por vapor, lo que permite un control eficiente y homogéneo de la temperatura durante todo el proceso de ebullición. La duración y la intensidad del hervor son ajustables, lo que brinda flexibilidad para adaptar cada receta a sus necesidades específicas.

Una vez finalizada la cocción, el hervidor funciona como sistema Whirlpool, una técnica de decantación centrífuga que permite separar eficientemente los sólidos en suspensión (lúpulo, proteínas coaguladas, etc.). Mediante la generación de un remolino controlado en el mosto caliente, los sólidos se concentran en el centro del fondo del tanque, formando un cono compacto que facilita su posterior retirada y garantiza un mosto limpio antes del enfriamiento.

El uso combinado de hervidor y Whirlpool en un solo recipiente optimiza el espacio, reduce el número de trasiegos y simplifica el diseño de la planta, aspectos especialmente relevantes en producciones de tamaño pequeño o mediano. Además, este sistema minimiza la pérdida de mosto y mejora la eficiencia general del proceso, contribuyendo a una cerveza más clara y estable desde sus primeras etapas de elaboración.



Figura 4-8. Hervidor con sistema Whirlpool

4.3.5 Intercambiador de calor de placas

El intercambiador de calor de placas es un equipo esencial en el proceso cervecero, cuya función principal es enfriar rápidamente el mosto caliente tras el hervor, llevándolo a una temperatura adecuada para la inoculación de la levadura sin comprometer su viabilidad ni la calidad microbiológica del producto.

Este sistema está compuesto por múltiples placas de acero inoxidable dispuestas en paralelo, formando canales alternos por los que circulan el mosto caliente y el agua fría (o glicol). La configuración de flujo a contracorriente maximiza la eficiencia térmica, permitiendo un intercambio de calor altamente efectivo en un espacio compacto.

Gracias a su diseño modular y su capacidad de limpieza CIP (Clean-In-Place), el intercambiador de placas garantiza un enfriamiento seguro e higiénico, reduciendo al mínimo el riesgo de contaminación en una etapa crítica del proceso. Además, permite un control preciso de la temperatura final del mosto, lo cual es esencial para asegurar una fermentación saludable.

En la producción de cerveza sin gluten, donde la estabilidad microbiológica es especialmente importante, este equipo cobra aún mayor relevancia al minimizar el tiempo en que el mosto permanece en temperaturas intermedias, favoreciendo así la conservación de sus propiedades y la seguridad del producto final.

Además, puede recuperarse el agua caliente generada durante el enfriamiento, lo que contribuye a la sostenibilidad del proceso mediante el ahorro energético y la reducción del consumo de agua.



Figura 4-9. Intercambiador de placas

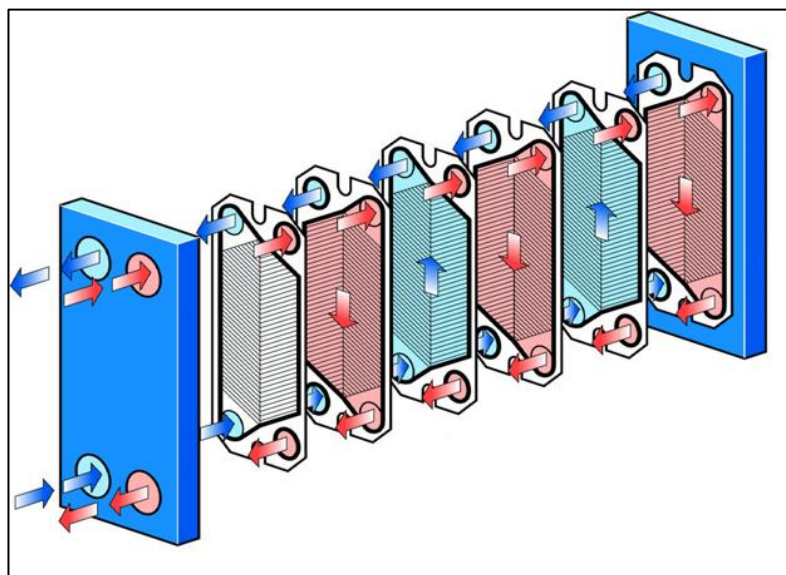


Figura 4-10. Esquema del intercambiador de placas

4.3.6 Tanque cilíndrico cónico

El tanque cilíndrico-cónico es un equipo fundamental en la etapa de fermentación de la cerveza sin gluten. Su estructura vertical, compuesta por un cuerpo cilíndrico y un fondo cónico con inclinación de 60° , permite una sedimentación eficiente de levaduras y otros sólidos, facilitando su recolección mediante una válvula inferior.

Está fabricado en acero inoxidable de calidad alimentaria, lo que garantiza durabilidad, resistencia a la corrosión y una limpieza sencilla mediante sistemas CIP. El tanque incorpora una chaqueta de refrigeración integrada en la superficie externa, diseñada para mantener la temperatura óptima durante la fermentación, controlada mediante sensores de temperatura y presión.

Durante esta etapa, el tanque proporciona un entorno controlado donde se lleva a cabo la fermentación primaria y, de forma específica en la elaboración sin gluten, la degradación de ciertas fracciones proteicas responsables de la intolerancia al gluten. Este proceso es facilitado por la actividad de levaduras y enzimas adaptadas, que

actúan eficazmente bajo condiciones adecuadas de temperatura y tiempo.



Figura 4-11. Tanque cilíndrico cónico

4.3.7 Tanque de dosificación de tierras diatomeas

El tanque de dosificación de tierras de diatomeas es un equipo auxiliar fundamental dentro del sistema de filtración de la cerveza sin gluten. Su función principal es preparar y mantener una suspensión homogénea de tierras de diatomeas en agua, que se dosifica de manera controlada en el flujo de cerveza antes de pasar por el filtro prensa.

Este tanque está fabricado en acero inoxidable de alta calidad, garantizando la higiene y durabilidad requeridas en la elaboración cervecera. Cuenta con un sistema de agitación mecánica que evita la sedimentación de las tierras, asegurando que la mezcla se mantenga uniforme durante todo el proceso.

La suspensión de tierras de diatomeas actúa como un medio filtrante auxiliar, formando una capa porosa sobre las placas del filtro prensa. Esta capa atrapa partículas microscópicas en suspensión, como levaduras residuales, proteínas y otros sólidos que afectan la claridad y estabilidad microbiológica de la cerveza.

La dosificación precisa desde este tanque permite optimizar el rendimiento del filtro prensa, mejorando la transparencia de la cerveza sin someterla a filtraciones agresivas que puedan eliminar componentes esenciales.



Figura 4-12. Tanque de dosificación de tierras diatomeas y filtro de placas

4.4 Diagrama de flujo de procesos (PFD)

En el Anexo I, se presenta el Diagrama de Flujo de Proceso de la planta, con el objetivo de detallar y clarificar las etapas del proceso como base para el desarrollo de la memoria de cálculo.

5 MEMORIA DE CÁLCULO

5.1 Justificación de la producción de la planta

La actividad consiste en la producción de cerveza artesanal sin gluten, con una capacidad proyectada de 75.000 litros anuales. Cada lote requiere 330 minutos de operación activa, seguido por 7 días de fermentación, 7 días de maduración y 120 minutos de filtración antes del almacenamiento. Si bien las tareas de elaboración se concentran en momentos puntuales, el proceso productivo en su conjunto opera de forma continua a lo largo del año, gracias al uso de fermentadores en paralelo que permiten mantener un flujo semanal constante de producción.

5.1.1 Estimación de la demanda de cerveza sin gluten en Sevilla

Como se analizó en el estudio de mercado, la población de la provincia de Sevilla se estima en 1,94 millones de habitantes, de los cuales un 25 % no consume alcohol por diversos motivos (salud, religión, edad o preferencias). Esto reduce la población potencial consumidora de cerveza a unos 1,45 millones de personas.

Dentro de este grupo, se estimó que aproximadamente el 1 % de la población es celíaca, lo que equivale a unas 19.400 personas. Si se incluye a personas con sensibilidad al gluten o con hábitos de consumo saludable, el público objetivo podría ampliarse hasta un 5 %, es decir, 72.500 personas. Estas cifras permiten definir dos escenarios de demanda para la cerveza sin gluten en la provincia:

- Escenario conservador: Considera solo a la población celíaca (19.400 personas).
- Escenario optimista: Incluye también a consumidores con sensibilidad al gluten y aquellos que prefieren productos sin gluten (72.500 personas).

Aplicando el consumo medio de 56 litros per cápita anuales, la demanda estimada sería:

- Escenario conservador:

$$19.400 \text{ personas} \cdot 56 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{año}} = 1.086.400 \frac{\text{litros}}{\text{año}} \quad \text{Ecuación 3}$$

- Escenario optimista:

$$72.500 \text{ personas} \cdot 56 \frac{\text{litros}}{\text{persona} \cdot \text{año}} = 4.060.000 \frac{\text{litros}}{\text{año}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para estimar la cuota de mercado inicial, se ha elegido un valor del 7 % sobre el escenario conservador, resultando en una demanda proyectada de aproximadamente 75.000 litros anuales.

La selección de este porcentaje se fundamenta en las siguientes consideraciones:

- Naturaleza de un mercado de nicho: La cerveza sin gluten representa un segmento muy específico dentro del mercado cervecero, con barreras naturales de entrada debido a la certificación, calidad y especificidad del producto.
- Competencia establecida: El mercado local ya cuenta con marcas consolidadas y distribución en diversos canales, lo que limita la penetración inmediata de un nuevo producto.
- Comportamiento de consumidores celíacos: Este segmento tiende a ser conservador y muy fiel a marcas que garanticen calidad y seguridad, por lo que la captación inicial es gradual.
- Experiencias de mercado: Estudios de introducción de productos artesanales en mercados locales indican que una cuota inicial de entre 5 % y 10 % es un rango realista para empresas emergentes, dependiendo de la estrategia comercial y la aceptación del consumidor.
- Estrategia prudente y sostenible: El 7 % representa un punto intermedio, que permite crecimiento sin asumir riesgos excesivos.

Este enfoque equilibrado facilita la planificación financiera y operativa, y sienta las bases para escalar producción conforme crezca la marca y se amplíe el mercado objetivo hacia consumidores con sensibilidad al gluten y preferencias saludables.

5.1.2 Dimensionamiento de la capacidad productiva

Con esta cuota de mercado, la demanda anual estimada es de 75.000 litros de cerveza artesanal sin gluten.

Una vez definida esta demanda, es necesario dimensionar la capacidad de producción de la microcervecería para asegurar el abastecimiento continuo y eficiente del mercado. La planta cuenta con un sistema de elaboración diseñado para producir 15 hectolitros (1.500 litros) por lote. Dado que el proceso completo de fermentación y maduración tiene una duración aproximada de 14 días, la producción diaria no resulta viable, por lo que se ha establecido un esquema de trabajo con un lote semanal, mediante el uso de fermentadores en paralelo. Esto permite iniciar un nuevo lote cada semana, aunque cada uno permanezca dos semanas en proceso, logrando una salida semanal de producto una vez alcanzado el régimen continuo.

Para cubrir exactamente la demanda de 75.000 litros, se requerirían:

$$\frac{75.000 \text{ litros}}{1.500 \frac{\text{litros}}{\text{lote}}} = 50 \frac{\text{lotes}}{\text{año}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Esto equivale a 50 semanas de producción si se trabaja con un lote semanal, dejando 2 semanas adicionales dentro del año para actividades de mantenimiento, pruebas, o imprevistos.

Cabe señalar que durante la primera semana de producción no se obtiene cerveza finalizada, ya que el primer lote se encuentra aún en fermentación y maduración. A partir de la segunda semana, el sistema escalonado permite una producción continua, entregando un lote terminado cada semana.

Este modelo de producción equilibra la capacidad operativa con la demanda real, evitando sobreproducción excesiva y optimizando los costes de almacenamiento y distribución. Además, permite escalabilidad, ya que, en caso de un aumento notable en la demanda, se podrían agregar más fermentadores o incrementar la frecuencia de producción sin necesidad de modificaciones estructurales significativas.

Tabla 5-1. Resumen del dimensionamiento

Concepto	Valor
Necesidad anual	76.048 litros
Capacidad por lote	1.500 litros
Lotes necesarios	50 lotes
Producción anual estimada	75.000 litros (50 · 1500)

5.1.3 Clasificación de la cervecería según su producción

En España, las cerveceras artesanales se dividen en diferentes categorías en función de su volumen de producción anual. Según los datos del sector, la clasificación es la siguiente:

Tabla 5-2. Tipos de cervecera y producción anual

Tipo de cervecera	Producción anual
Nanocervecera	< 24.000 litros
Microcervecera	24.000 – 100.000
Pequeña cervecera	>100.000

Dado que la producción anual es de 75.000 litros, la planta se sitúa en la categoría de microcervecería, que representa el 41% de las fábricas de cerveza artesanal en España. Este segmento del mercado permite operar con una oferta diferenciada, enfocada en la calidad y la especialización en cerveza sin gluten, sin necesidad de competir en volumen con las grandes cerveceras industriales [24].

5.2 Balance de materia

5.2.1 Introducción

En este apartado se realiza el cálculo teórico de las cantidades de materias primas que circulan a través de los equipos de la instalación para la receta propuesta, que utiliza malta de cebada como materia prima principal.

La metodología empleada se basa en la Ley de Conservación de la Materia, la cual establece que la masa total de los reactivos es igual a la masa total de los productos, considerando también los reactivos no consumidos. Esto implica que el número de átomos se mantiene constante durante el proceso, aunque el número de moles puede variar. Esta relación se expresa mediante la Ecuación 6.

$$E - S + G - C = A \quad \text{Ecuación 6}$$

Siendo:

E: masa que entra a través de los límites del sistema.

S: masa que sale a través de los límites del sistema.

G: masa generada dentro del sistema.

C: masa consumida dentro del sistema.

A: masa acumulada dentro del sistema.

Para garantizar que el sistema de ecuaciones sea compatible y pueda ser resuelto, se ha igualado el número de ecuaciones al número de incógnitas, apoyándose en datos experimentales. La resolución del sistema algebraico se ha llevado a cabo utilizando Excel, que permite resolver los balances de materia necesarios para modelar el proceso.

5.2.2 Cálculos para el balance de materia

Para la elaboración del balance de materia en este proyecto, se ha dividido el diagrama de flujo del proceso cervecero en seis etapas, que coinciden con los distintos equipos utilizados en la planta. Esta estructura permite analizar de forma detallada el flujo de materias primas y productos intermedios a lo largo de cada operación unitaria, facilitando el seguimiento de las pérdidas, rendimientos y transformaciones clave. La Tabla 5-3 presenta las cantidades necesarias para la elaboración de 1.500 litros de cerveza. Los datos de los que se han partido se han ido mencionando a lo largo del proceso.

Tabla 5-3. Cantidad de materias primas

MALTA	LÚPULO	LEVADURA	ENZIMA
Cantidad (kg/1500L)	Cantidad (kg/1500L)	Cantidad (kg/1500L)	Cantidad (kg/1500L)
450	1,5	0,75	0,00375

Para determinar con precisión el grado alcohólico de la receta, es esencial conocer las densidades en las etapas clave del proceso de elaboración. Inicialmente, se mide la densidad del mosto al salir del tanque de maceración (ρ_6). Durante la cocción, la ebullición provoca la concentración de la mezcla, lo que incrementa su densidad (ρ_{15}). A continuación, en la fermentación, la levadura consume la mayoría de los azúcares, generando etanol (menos denso que el mosto) y dióxido de carbono, que se libera al ambiente. Como resultado, la densidad de la cerveza en fermentación (ρ_{25}) disminuye respecto a la del mosto cocido. Para esta cerveza en particular, se ha fijado un contenido alcohólico objetivo del 5 % en volumen, equivalente a 0,05 litros de etanol por litro de producto final.

Para los cálculos se establece como base 1 litro de mezcla. Se dispone de la densidad del etanol (ρ_{et}) igual a 0,79 kg/L y un volumen de etanol en la mezcla del 5 %. Para determinar las densidades y el rendimiento fermentativo, es fundamental conocer la conversión de etanol por gramo de glucosa consumida, conocido como rendimiento (η).

La Ecuación 2 corresponde a una simplificación de la ruta metabólica Embden-Meyerhof-Parnas (EMP), también conocida como glucólisis [37], en la cual no se contempla el crecimiento de biomasa.

A partir de los pesos moleculares, se puede calcular el rendimiento teórico de producción de etanol por cada gramo de sustrato, utilizando la ecuación 7. Los valores considerados son:

- Peso molecular de glucosa ($C_6H_{12}O_6$): 180 g/mol
- Peso molecular de etanol (C_2H_5OH): 46 g/mol

El rendimiento teórico se determina como:

$$\eta = \frac{g \text{ de etanol producido}}{g \text{ de glucosa consumida}} = \frac{2 \cdot 46}{180} = 0,5111 \frac{g \text{ EtOH}}{g \text{ Glucosa}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Este valor representa el máximo rendimiento posible bajo condiciones ideales, en las que toda la glucosa se transforma en etanol y dióxido de carbono, sin consumo adicional para el mantenimiento celular ni el crecimiento.

Sin embargo, en condiciones reales este rendimiento disminuye, ya que parte de la energía disponible se destina al metabolismo celular y a la formación de biomasa. Para considerar esta desviación de manera sencilla, se puede emplear el rendimiento observado de etanol (η_{obs}), que ya incluye dicha pérdida. La diferencia entre el rendimiento teórico y el observado se puede interpretar como la fracción de sustrato utilizada por la levadura para crecer. La fracción de glucosa destinada a la producción celular puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Glucosa para biomasa} = m_{glucosa \text{ total}} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{obs}}{\eta_{teórico}}\right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Por ejemplo, si se fermentan 100 g de glucosa y el rendimiento observado es 0,469 g etanol/g glucosa, frente al teórico de 0,511 g/g, se estima que aproximadamente un 8,2 % de la glucosa se ha utilizado para la formación de biomasa. Este valor experimental fue obtenido en un estudio sobre la cinética fermentativa de *Saccharomyces cerevisiae* a 20 °C [38].

Para continuar con los cálculos de densidad en el proceso, se requiere la información contenida en la Tabla 5-4, la cual proporciona la correspondencia entre el contenido de azúcar (expresado en grados Brix), la densidad de la disolución y la cantidad de azúcar en kilogramos por litro de mezcla. Estos datos permiten estimar de forma precisa la concentración de azúcares en función de la densidad, lo cual resulta esencial para el cálculo del contenido en extracto del mosto cocido.

Tabla 5-4. Relación °Brix, densidad y kg de sólido por litro de agua

°Brix	Densidad	kg de sólido por litro de agua
1	1,00106	0,0100
2	1,00495	0,0201
3	1,00887	0,0303
4	1,01282	0,0405
5	1,01680	0,0508
6	1,02080	0,0612
7	1,02483	0,0717
8	1,02888	0,0823
9	1,03297	0,0930
10	1,03709	0,1037
11	1,04123	0,1145
12	1,04541	0,1254

A partir de aquí, se procede al cálculo de la densidad del mosto cocido (ρ_{14}). En primer lugar, mediante la Ecuación 9, se determina la masa de etanol conociendo su volumen (0,05 litros de etanol por litro de mezcla).

$$m_{EtOH\ 15} = V_{EtOH} \cdot \rho_{EtOH} = 0,05 \cdot 0,79 = 0,0395\ kg \quad \text{Ecuación 9}$$

Posteriormente, se estima la masa de azúcares fermentables necesaria para generar la cantidad de etanol obtenida, utilizando el rendimiento, según se indica en la Ecuación 10:

$$m_{Azúcares\ Ferm\ 15} = \frac{m_{EtOH}}{\eta_{obs}} = \frac{0,0395}{0,469} = 0,0842\ kg \quad \text{Ecuación 10}$$

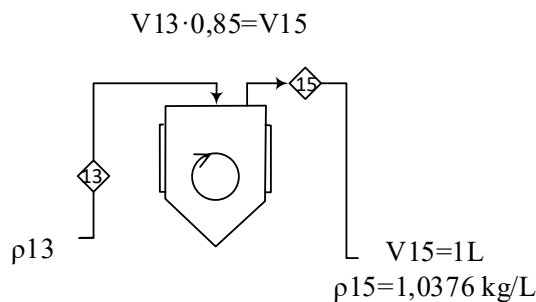
En este contexto, se considera que la glucosa representa el total de azúcares fermentables presentes en el mosto, ya que es el principal sustrato empleado por la levadura para la producción de etanol. Dado que se estima que el 80 % del total de azúcares del mosto son fermentables [39], se calcula la masa total de azúcares (fermentables + no fermentables) mediante la Ecuación 11:

$$m_{Azúcares\ Tot\ 15} = \frac{m_{Azúcares\ Ferm\ 15} \cdot 100}{80} = \frac{0,0842 \cdot 100}{80} = 0,1052\ kg \quad \text{Ecuación 11}$$

Este valor permite estimar la densidad del mosto cocido utilizando la correspondencia con los grados Brix que se muestra en la Tabla 5-4.

$$\frac{\rho_{15} - 1,04123}{0,1052 - 0,1145} = \frac{1,04541 - 1,04123}{0,1254 - 0,1145} \rightarrow \rho_{15} = 1,0376\ \frac{kg}{L} \quad \text{Ecuación 12}$$

Para determinar la densidad del mosto a la salida del macerador (ρ_6), se parte de la base de que durante la cocción se produce una reducción del volumen del 15 %, debido a la evaporación del agua [40]. Asimismo, se conoce la cantidad de azúcares presentes al final de la cocción ($m_{Azúcares\ Tot\ 15}$) y, como en el caso anterior, se considera una base de cálculo de un litro de producto.

Figura 5-1. Diagrama para calcular ρ_{13} .

El primer paso consiste en calcular el volumen inicial necesario a la entrada del macerador (V_{12}), para que, tras la reducción del 15 % en la cocción, se obtenga 1 litro de mezcla final. Este cálculo se realiza mediante la Ecuación 13:

$$V_{13} \cdot 0,85 = 1 \rightarrow V_{13} = 1,1765 \text{ L} \quad \text{Ecuación 13}$$

A continuación, se calcula la masa de azúcares que contiene ese volumen inicial, aplicando una simple proporción:

$$m_{\text{Azúcares Tot } 13} = m_{\text{Azúcares Tot } 15} \cdot \frac{1}{1,1765} = 0,1052 \cdot \frac{1}{1,1765} = 0,0894 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 14}$$

Finalmente, para obtener la densidad del mosto a la salida del macerador (ρ_{13}), se utiliza la Tabla 5-4 y se realiza una interpolación lineal entre los valores más cercanos al contenido de azúcar calculado, tal como se muestra en la Ecuación 15.

$$\frac{\rho_{13}-1,02888}{0,0894-0,0823} = \frac{1,03297-1,02888}{0,0930-0,0823} \rightarrow \rho_{13} = 1,0316 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Para determinar la densidad de la cerveza final (ρ_{28}), es necesario primero calcular, mediante interpolación en la Tabla 5-4, la densidad correspondiente a la mezcla de azúcares excluyendo el etanol. Este cálculo se basa en la masa de azúcares no fermentables ($m_{\text{Azúcares No Ferm } 15}$), la cual se obtiene restando la masa de azúcares fermentables ($m_{\text{Azúcares Ferm } 15}$) de la masa total de azúcares presentes antes de la fermentación ($m_{\text{Azúcares Tot } 15}$), como se expresa en la Ecuación 16:

$$m_{\text{Azúcares No ferm } 15} = m_{\text{Azúcares Tot } 15} - m_{\text{Azúcares Ferm } 15} = 0,1052 - 0,0842 = 0,021 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\frac{\rho_{28}-1,00495}{0,021-0,0201} = \frac{1,00887-1,00495}{0,0303-0,0201} \rightarrow \rho_{28} = 1,0053 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \quad \text{Ecuación 17}$$

En este punto, ya contamos con la densidad del líquido sin considerar el etanol, como se muestra en la Tabla 5-5. Las cantidades de etanol fueron calculadas previamente, y la base de cálculo utilizada es el volumen total de cerveza. Para determinar el volumen de la fase no alcohólica, simplemente restamos el volumen correspondiente al etanol del volumen total de la cerveza. Con esta información y la densidad obtenida, podemos calcular la masa de la misma.

Tabla 5-5. Cálculo de la densidad de la cerveza (ρ_{28})

Componente	Volumen (L)	Densidad (kg/L)	Masa (kg)
Etanol	0,05	0,79	0,0395
Fase no alcohólica	0,95	1,0053	0,9550
Cerveza	1	0,9945	0,9945

La Tabla 5-6 recoge todas las variables conocidas hasta este punto del proceso, lo que permite proceder con los balances de materia. Para estimar la cantidad de bagazo generado a partir de las materias primas, se emplean unos coeficientes de conversión obtenidos a partir de ensayos experimentales.

Tabla 5-6. Datos de partida para el balance de materia

Corriente	Descripción	Valor	Unidades
m1	Malta	450	kg
m14	Lúpulo	1,5	kg
m24	Levadura	0,75	kg
V28	Cerveza	1500	L
ρ_{13}	Densidad mosto	1,0316	kg/L
ρ_{15}	Densidad mosto cocido	1,0376	kg/L
ρ_{28}	Densidad cerveza	0,9945	kg/L
VEtOH	Grado alcohólico	5	%
m11	Bagazo grano	247,5	kg
m16	Bagazo lúpulo	4,5	kg
m29	Bagazo levadura	45	kg

A modo complementario, en la Tabla 5-7 se presenta un resumen orientativo de los residuos típicos generados por hectolitro de cerveza elaborada, según datos obtenidos de la literatura técnica [\[41\]](#). Esta información sirve como referencia para validar los valores utilizados en el presente estudio, particularmente en lo que respecta al bagazo de malta, de levadura y al residuo derivado del lúpulo tras la cocción.

Tabla 5-7. Residuos principales

Residuo	Conversión típica (kg/hL)	Resultado en 1500 L de cerveza (kg)	Total estimado (kg)
BSG (bagazo de grano)	14-19	210-285	247,5
HT (residuo de lúpulo)	0,2-0,4	3-6	4,5
RY (levadura residual)	2-4	30-60	45

Es importante destacar que, aunque la cantidad de lúpulo añadido al proceso es relativamente pequeña (aproximadamente 1,5 kg por cada 450 kg de malta), este insumo se considera en los balances de materia debido a que su masa inicial corresponde directamente al residuo sólido de lúpulo generado después de la cocción. Por tanto, para mantener la coherencia en el balance de masa, tanto la adición de lúpulo como el residuo resultante se incluyen en los cálculos de balances de materia y energía de los equipos.

Sin embargo, dado que la contribución del lúpulo y otros residuos sólidos a la masa total y al volumen del mosto es mínima, estos no se consideran para el cálculo de la densidad del mosto ni del producto final.

Por otro lado, insumos como la enzima degradadora de gluten, que actúa sobre proteínas específicas y no influye en los azúcares fermentables ni en la producción de etanol, no forman parte del balance principal de materia y energía y, por ende, no se incluyen en dichos cálculos. Su uso es fundamental para asegurar el cumplimiento normativo en productos “sin gluten”.

En el presente análisis, y con el fin de simplificar el esquema de gestión de residuos sólidos, se ha considerado que:

- El bagazo de grano se retira en el filtro prensa (PF-101), donde se separan los sólidos insolubles tras la maceración.
- El bagazo de levadura se retira en el filtro de tierras de diatomeas (TKTD-101), donde se eliminan las partículas en suspensión y restos celulares tras la fermentación.

Aunque parte de estos residuos se purga previamente desde los tanques de proceso (como el macerador o el fermentador), para efectos de balance y descripción funcional se ha asumido su retiro en las etapas de filtración correspondientes.

En el análisis y control del transporte de malta mediante soplante, no se contabiliza la masa del aire presente en la corriente debido a que su contribución a la masa total es insignificante en comparación con la masa de la malta. La densidad del aire es mucho menor que la del sólido, por lo que su impacto en los balances de materia es despreciable. Además, el aire actúa únicamente como un medio de transporte y no forma parte del producto ni de la materia prima que se procesa. Esta práctica está ampliamente aceptada en la industria y en la literatura técnica, simplificando así el análisis sin comprometer la precisión ni la eficiencia del proceso.

A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas en cada etapa:

- Molienda: En esta etapa no hay un balance complejo de masa porque no hay transformación: solo se tritura la malta para facilitar la extracción posterior.

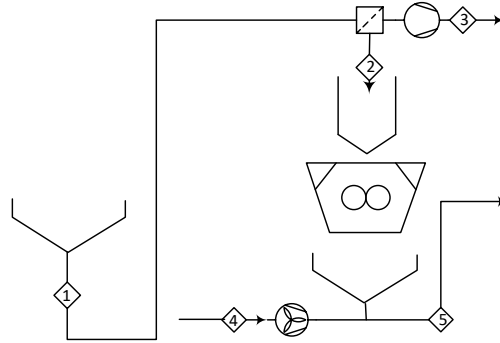


Figura 5-2. Diagrama de flujo (molienda)

$$m_{\text{Malta } 1} = m_{\text{Malta } 2} = m_{\text{Malta } 5}$$

Ecuación 18

- **Macerado:** En esta etapa se realiza la extracción de compuestos fermentables y otros solubles desde la malta molida hacia el agua de proceso, generando el mosto cervecero. El proceso también genera un residuo sólido conocido como bagazo húmedo, compuesto por restos insolubles de la malta más el agua retenida en estos.

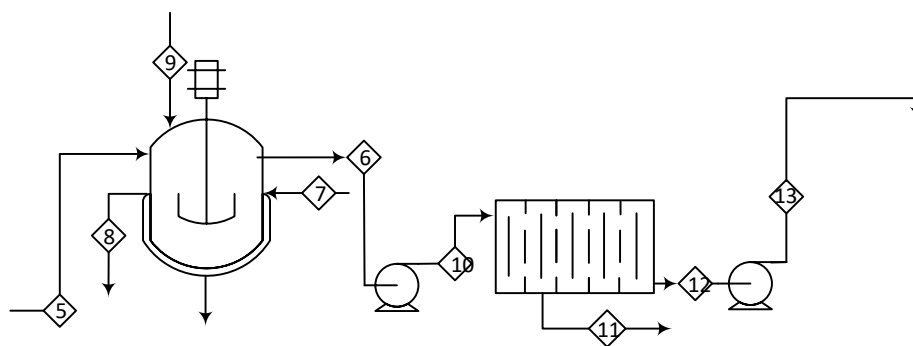


Figura 5-3. Diagrama de flujo (macerado)

$$m_{\text{Agua } 9} + m_{\text{Malta } 5} = m_{\text{Mosto } 13} + m_{\text{Bagazo Grano } 11}$$

Ecuación 19

- **Cocción y enfriamiento:** En esta etapa, el mosto procedente del macerado es hervido para isomerizar los ácidos del lúpulo, esterilizar la mezcla y favorecer la coagulación de proteínas. Durante este proceso se generan pérdidas por evaporación y se acumula un residuo sólido en el fondo del tanque (bagazo de lúpulo y compuestos del trub).

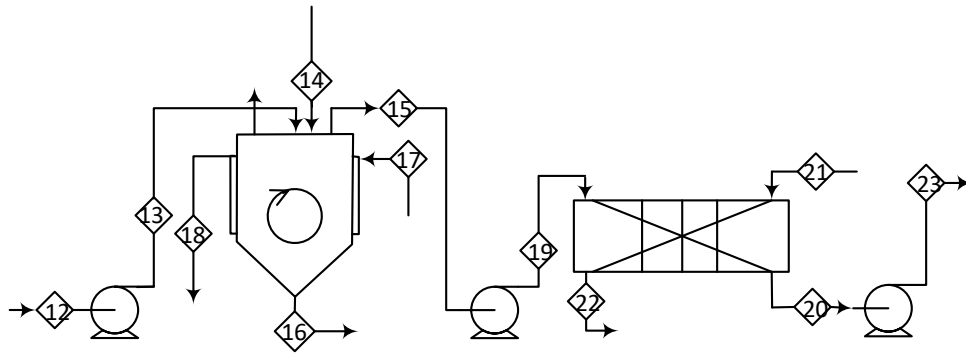


Figura 5-4. Diagrama de flujo (cocción)

$$m_{\text{Mosto } 13} + m_{\text{Lúpulo } 14} = m_{\text{Mosto Cocido } 15} + m_{\text{Evaporado}} + m_{\text{Residuo sólido } 16} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde se considera una pérdida por evaporación del 15% respecto al mosto inicial.

$$m_{\text{Evaporado}} = V_{\text{Evaporado}} \cdot \rho_{\text{Evaporado}} \quad \text{Ecuación 21}$$

$$V_{\text{Evaporado}} = V_{\text{Mosto } 13} \cdot 0,15 \quad \text{Ecuación 22}$$

$$V_{\text{Mosto } 13} \cdot 0,85 = V_{\text{Mosto Cocido } 15}$$

$$V_{\text{Mosto } 13} = m_{\text{Mosto } 13} / \rho_{\text{Mosto } 13} \quad \text{Ecuación 23}$$

En el enfriamiento:

$$m_{\text{Mosto Cocido } 15} = m_{\text{Mosto } 19} = m_{\text{Mosto } 23} \quad \text{Ecuación 24}$$

- Fermentación: En esta etapa, el mosto es transformado en cerveza mediante la acción de las levaduras, que metabolizan los azúcares presentes generando etanol y dióxido de carbono. Como subproducto, se genera una biomasa de levadura que debe ser retirada tras la fermentación.

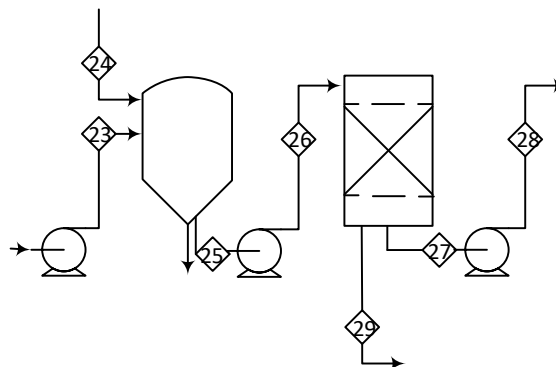


Figura 5-5. Diagrama de flujo (fermentación)

$$m_{\text{Mosto } 23} + m_{\text{Levadura(+enzima) } 24} = m_{\text{Cerveza } 28} + m_{\text{Levadura residual } 29} \quad \text{Ecuación 25}$$

- Maduración y guarda:

$$m_{\text{Cerveza } 28} = V_{\text{Cerveza } 28} \cdot \rho_{\text{Cerveza } 28} \quad \text{Ecuación 26}$$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 5-8. Resultados del balance de materia

Corriente	Valor	Unidades
$m_{\text{Malta 2}}$	450	kg
$m_{\text{Malta 5}}$	450	kg
$m_{\text{Agua 9}}$	1.594,1078	kg
$m_{\text{Bagazo grano 11}}$	247,5	kg
$m_{\text{Mosto 13}}$	1.796,6078	kg
$m_{\text{Mosto Cocido 15}}$	1.536	kg
$m_{\text{Evaporado}}$	257,6077	kg
$m_{\text{Residuo sólido 16}}$	4,5	kg
$m_{\text{Mosto 19}}$	1.536	kg
$m_{\text{Mosto 23}}$	1.536	kg
$m_{\text{Cerveza 28}}$	1.491,75	kg
$m_{\text{Levadura res 29}}$	45	kg
$V_{\text{Mosto 13}}$	1.741,5756	L
$V_{\text{Mosto Cocido 15}}$	1.480,3392	L
$V_{\text{Cerveza 28}}$	1500	L
$\rho_{\text{Mosto 13}}$	1,0316	kg/L
$\rho_{\text{Mosto 15}}$	1,0376	kg/L
$\rho_{\text{Cerveza 28}}$	0,9945	kg/L

En el Anexo II se incluye una tabla que presenta el balance de materia completo, en la que se definen detalladamente todas las corrientes del proceso.

5.3 Balance de energía

5.3.1 Introducción

Este apartado presenta el balance energético de la planta de producción de cerveza sin gluten. Se calculará la cantidad de energía térmica (kJ) y potencia térmica (kW) requerida por cada etapa del proceso, considerando las temperaturas de operación, los tiempos de cada fase, y las masas involucradas en cada corriente.

5.3.2 Diagrama cronológico de operaciones térmicas

En el diagrama cronológico de operaciones térmicas, se identifican claramente las etapas donde se produce la mayor transferencia de calor en la planta cervecera. Las principales fuentes de aporte de calor en el proceso cervecero se encuentran en las etapas de macerado y cocción, donde se suministra energía térmica para alcanzar y mantener las temperaturas necesarias para la extracción de azúcares y la esterilización del mosto, respectivamente.

Por otro lado, las etapas de fermentación, maduración y almacenamiento requieren una retirada continua de calor, ya que el producto debe mantenerse a bajas temperaturas durante periodos prolongados para

asegurar su estabilidad y calidad. En particular, durante el almacenamiento, que puede extenderse hasta un máximo de 4.320 minutos, es necesario controlar cuidadosamente las condiciones térmicas para evitar fluctuaciones indeseadas.

La etapa de enfriado también implica una retirada de calor significativa, aunque se trata de un proceso más breve, destinado a reducir rápidamente la temperatura del mosto antes de su fermentación.

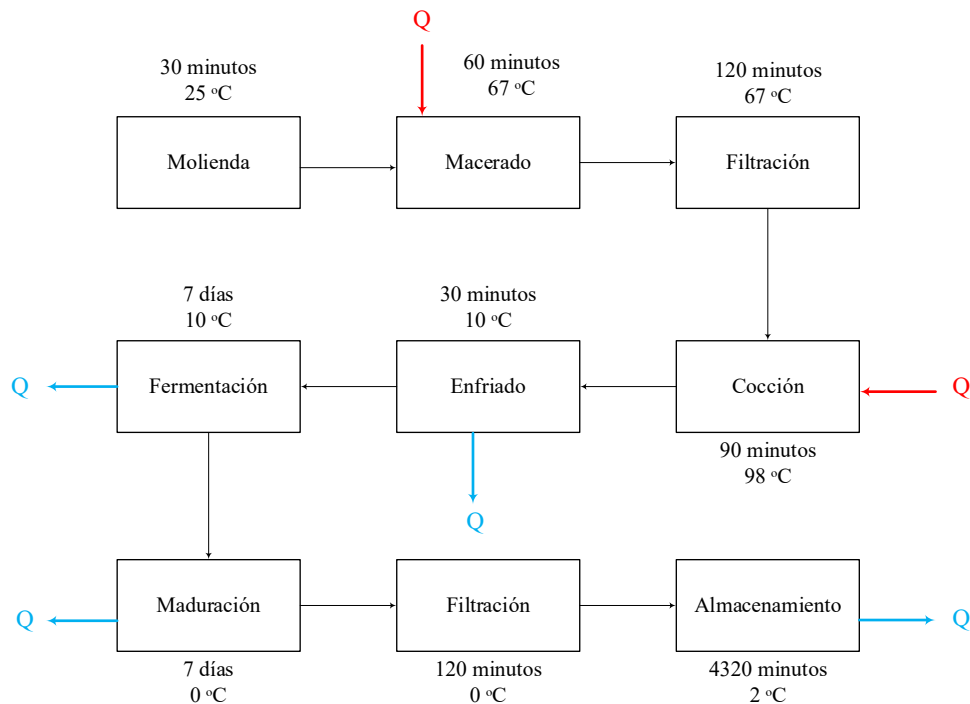


Figura 5-6. Diagrama de bloques del proceso térmico para la producción de cerveza sin gluten, indicando temperatura y tiempo de operación en cada etapa

5.3.3 Cálculos para el balance de energía

Antes de iniciar los cálculos energéticos, es fundamental recopilar y definir todos los datos necesarios. En este caso, el dimensionamiento se realiza para un lote de 1.500 litros de cerveza, que corresponde a la capacidad total de producción por lote del sistema diseñado.

Los grados Brix, que ya se han mencionado anteriormente en relación con el cálculo de las densidades del mosto, son una variable clave en este proceso, ya que influyen directamente en el calor específico (C_p) de la mezcla.

Para estimar el C_p del mosto, se ha utilizado un modelo por fracciones ponderadas (método por componentes), que consiste en calcular el calor específico como una combinación lineal del calor específico del agua y del de los sólidos disueltos (principalmente azúcares), en función de sus respectivas fracciones másicas.

La expresión general del modelo es la siguiente:

$$C_p = x_{\text{Agua}} \cdot C_{p\text{Agua}} + x_{\text{Sólidos}} \cdot C_{p\text{Sólidos}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

$$x_{\text{Agua}} = \frac{100 - \text{Brix}}{100}$$

$$x_{\text{Sólidos}} = \frac{\text{Brix}}{100}$$

$$C_{p\text{Agua}} = 4,184 \text{ kJ/kgK}$$

$$Cp_{\text{sólidos}} = 0,84 \text{ kJ/kgK}$$

Sustituyendo, se obtiene:

$$C_p = \left(\frac{100 - \text{Brix}}{100} \cdot 4,184 \right) + \left(\frac{\text{Brix}}{100} \cdot 0,84 \right) \quad \text{Ecuación 28}$$

Si bien el modelo por fracciones ponderadas utilizado para el mosto se basa en la proporción de sólidos disueltos (°Brix) para estimar el calor específico (C_p), este enfoque deja de ser aplicable una vez finalizada la fermentación, es decir, en la cerveza terminada. Esto se debe a que, durante la fermentación, los azúcares medidos como °Brix son transformados en etanol y CO_2 . Como resultado, la cerveza terminada puede tener un °Brix cercano a cero, lo que según la fórmula daría un C_p igual al del agua (4,184 kJ/kg·K). Sin embargo, esto no representa correctamente la composición real de la cerveza, ya que contiene alcohol (etanol), cuyo calor específico es considerablemente menor (2,43 kJ/kg·K).

Dado que disponemos de datos precisos sobre el volumen, densidad y masa de los principales componentes de la cerveza, podemos estimar el calor específico real utilizando un modelo por fracciones másicas. Calculamos las fracciones másicas de cada componente con respecto a la masa total con los datos de la tabla 5-5:

$$x_{\text{EtOH}} = \frac{0,0395}{0,9945} = 0,0397 \quad \text{Ecuación 29}$$

$$x_{\text{Azúcares}} = \frac{0,9550}{0,9945} = 0,9603 \quad \text{Ecuación 30}$$

Usando un modelo por componentes, el C_p total se calcula como la suma ponderada de los calores específicos de los componentes:

$$C_p = x_{\text{Etanol}} \cdot Cp_{\text{EtOH}} + x_{\text{Azúcares}} \cdot Cp_{\text{Azúcares}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Con valores típicos:

$$Cp_{\text{EtOH}} = 2,43 \text{ kJ/kgK}$$

$$Cp_{\text{Azúcares}} = 4,18 \text{ kJ/kgK} \text{ (valor aproximado para solución acuosa de azúcares)}$$

Dado que el mosto cervecero está compuesto mayoritariamente por agua y pequeñas cantidades de sólidos disueltos como azúcares (que no se evaporan) y trazas de etanol (en etapas posteriores del proceso), se puede asumir que su calor latente de vaporización es muy similar al del agua pura. El valor comúnmente aceptado para el calor latente de vaporización del agua a 100 °C es de 2.256 kJ/kg. Aunque durante la cocción del mosto se alcanza una temperatura de unos 98 °C y se produce una pérdida de volumen por evaporación (alrededor del 15 %), las propiedades termodinámicas del sistema permanecen suficientemente próximas a las del agua para adoptar este valor como una estimación razonable.

Se considerarán insignificantes las pérdidas térmicas durante todas las etapas, excepto en el almacenamiento. Durante el almacenamiento, la temperatura inicial será de 0 °C y podrá aumentar hasta un máximo de 2 °C, impidiendo que supere este valor para garantizar condiciones óptimas de conservación.

A continuación, se presentan los valores de masa, densidad, temperatura inicial y final, así como los tiempos estimados para cada etapa del proceso, los cuales se utilizarán en el balance energético.

Tabla 5-9. Datos de partida para el balance de energía

Etapas	Descripción	Masa (kg)	Volumen (L)	Densidad (kg/L)	°Brix	Cp (kJ/kg K)	λ_v (kJ/kg)	T _e (°C)	T _s (°C)	t(s)
Macerado	Subida de T ^a	2.044,1094	1.981,4942	1,0316	8,665	3,894		25	67	3.600
Cocción	Subida de T ^a	1.536	1.480,3392	1,0376	10,123	3,845		67	98	5.400
Cocción	Evaporación	257,608					2.256			
Enfriado	Bajada de T ^a	1.536	1480,3392	1,0376	10,123	3,845		98	10	1.800
Fermentación	Control del Q de reacción	1.536,75	1545,2489	0,9945	0	4,111		10	10	60.4800
Maduración	Bajada de T ^a	1.536,75		0,9945	0	4,111		10	0	60.4800
Almacenamiento	Mantenimiento de T ^a	1.491,75	1500	0,9945	0	4,111		0	2	-

Una vez obtenidos los datos requeridos, se procederá a realizar los cálculos del balance energético basados en el primer principio de la termodinámica. Para ello, se utilizarán las ecuaciones que describen el calor intercambiado durante los procesos de variación de temperatura y cambio de estado. La primera ecuación calcula el calor cedido o absorbido por una masa en función de su cambio de temperatura, mientras que la segunda corresponde al calor involucrado en las transiciones de fase.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación 32}$$

$$Q = m \cdot \lambda_v \quad \text{Ecuación 33}$$

- Macerado: Durante esta fase, la temperatura inicial (T_e) es de 25 °C y se eleva hasta una temperatura final (T_s) de 67 °C en un tiempo (t) de 3.600 segundos (1 hora).

El cálculo del calor requerido para esta subida de temperatura se realiza mediante la expresión:

$$Q_m = m_m \cdot C_{p_m} \cdot (T_{ms} - T_{me}) \quad \text{Ecuación 34}$$

donde Q es el calor transferido en kilojulios (kJ), m es la masa en kilogramos (kg), C_p la capacidad calorífica específica en kJ/kgK, y T_{ms} y T_{me} las temperaturas final e inicial en grados Celsius (°C).

La potencia necesaria para llevar a cabo esta transferencia de calor en el tiempo establecido se calcula como:

$$P_m = \frac{Q_m}{t_m} \quad \text{Ecuación 35}$$

donde P es la potencia en kilovatios (kW), Q el calor transferido en kilojulios (kJ), y t el tiempo en segundos (s).

- **Cocción:** La cocción se divide en dos fases principales. La primera corresponde a la subida de temperatura del mosto recién macerado hasta alcanzar la temperatura de ebullición, que se considerará 98°C. El calor necesario para esta subida de temperatura se calcula como:

$$Q_c = m_c \cdot Cp_c \cdot (T_{cs} - T_{ce}) \quad \text{Ecuación 36}$$

La potencia requerida para esta fase es:

$$P_c = \frac{Q_c}{t_c} \quad \text{Ecuación 37}$$

En la segunda fase de cocción, se mantiene el hervor durante una hora. El calor aportado en esta etapa será igual al calor latente necesario para evaporar la cantidad de agua, estimada en 257,608 kg.

$$Q_{\text{evap}} = m_{\text{evaporado}} \cdot \lambda_v \quad \text{Ecuación 38}$$

La potencia necesaria para mantener el hervor durante el tiempo t es:

$$P_{\text{evap}} = \frac{Q_{\text{evap}}}{t_c} \quad \text{Ecuación 39}$$

- **Enfriado:** Antes de iniciar la fermentación, es necesario enfriar el mosto cocido desde aproximadamente 98 °C hasta 10 °C. El calor que hay que extraer y la potencia requerida durante esta etapa se calcula mediante:

$$Q_e = m_e \cdot Cp_e \cdot (T_{es} - T_{ee}) \quad \text{Ecuación 40}$$

$$P_e = \frac{Q_e}{t_e} \quad \text{Ecuación 41}$$

- **Fermentación:** En la fermentación, la levadura convierte la glucosa en etanol, liberando calor en el proceso. Para calcular el calor liberado, primero se debe conocer la reacción química estequiométrica que describe esta transformación.

La fermentación alcohólica se representa mediante la Ecuación 2. Para determinar el calor de reacción (ΔH_{reac}) asociado a esta transformación, se utiliza las entalpías de formación estándar de los compuestos involucrados siguiendo la Ecuación 44.

$$\Delta H_{\text{reac}} (298 \text{ K}) = \sum (v_i \cdot \Delta H_{\text{comb, productos}}) - \sum (v_i \cdot \Delta H_{\text{comb, reactivos}}) \quad \text{Ecuación 42}$$

donde v_i son los coeficientes estequiométricos de cada especie.

Los entalpías de formación utilizadas son:

- Glucosa: -1.261,1 kJ/mol
- Etanol: -277,7 kJ/mol
- Dióxido de carbono: -393,5 kJ/mol

Sustituyendo:

$$\Delta H^{\circ}_{\text{reac}} (298 \text{ K}) = (2 \cdot (-277,7) + 2 \cdot (-393,5)) - (1 \cdot -1.261,1) = -81,3 \text{ kJ/mol} \quad \text{Ecuación 43}$$

El resultado negativo indica que la fermentación es una reacción exotérmica, liberando aproximadamente 81,3 kJ por mol de glucosa fermentada.

Como la fermentación se lleva a cabo a 10 °C (283 K), se aplica una corrección de temperatura mediante los calores específicos:

- Cp_{Glucosa} : 0,2192 kJ/mol
- Cp_{Etanol} : 0,1124 kJ/mol
- $Cp_{\text{Dióxido de carbono}}$: 0,03735 kJ/mol

Con estos valores, se puede calcular:

$$\Delta C_p = (2 \cdot 0,1124 + 2 \cdot 0,03735) - (1 \cdot 0,2192) = 0,0803 \text{ kJ/mol} \quad \text{Ecuación 44}$$

Luego, la corrección de entalpía entre 298 K y la temperatura T de reacción:

$$\Delta H_{\text{reac}}(283\text{K}) = \Delta H^{\circ}_{\text{reac}}(298\text{K}) + \Delta C_p \cdot (283 - 298) = -82,5 \text{ kJ/mol} \quad \text{Ecuación 45}$$

donde la $\Delta H^{\circ}(298)$ se tiene de la ley de Hess.

Para expresar este valor en función de la masa de glucosa, se ajusta dividiendo entre el peso molecular de la glucosa (180 g/mol) y multiplicando por 1000 para convertir a kJ/kg:

$$\Delta H_{\text{reac}} = \frac{-82,5 \cdot 1000}{180} = -458,3 \text{ kJ/kg} \quad \text{Ecuación 46}$$

Este valor es fundamental para el balance energético del proceso fermentativo, ya que representa la energía térmica liberada durante la conversión de glucosa en etanol y dióxido de carbono. Además, el signo negativo y la magnitud concuerdan con la literatura, que reporta la fermentación alcohólica como un proceso exotérmico y espontáneo.

Entonces, la energía total liberada en esta etapa será:

$$Q_f = m_{\text{Azúcares Ferm 15}} \cdot \Delta H_{\text{reac}} = 0,0842 \text{ kg/L} \cdot 1.500 \text{ L} \cdot (-458,3 \text{ kJ/kg}) = -57.883,29 \text{ kJ} \quad \text{Ecuación 47}$$

Durante el proceso de fermentación alcohólica, además del calor liberado por la reacción exotérmica, existen pérdidas térmicas asociadas al entorno. Estas pérdidas se deben principalmente a la transferencia de calor desde el fermentador hacia el exterior, motivada por la diferencia de temperatura entre el interior del tanque (mantenido a 10 °C) y la temperatura ambiente. En condiciones reales, este efecto puede ser significativo, ya que el proceso puede durar varios días y genera una acumulación de energía que debe ser compensada mediante sistemas de refrigeración.

Una forma habitual de estimar estas pérdidas es considerar un descenso simulado de temperatura (por ejemplo, 2-3 °C por día) y aplicar la ecuación de calor sensible:

$$Q_{\text{pérdidas}} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación 48}$$

donde m es la masa total del mosto, c_p es el calor específico medio de la mezcla y ΔT representa el total de grados que deberían compensarse.

Sin embargo, en este estudio no se han tenido en cuenta dichas pérdidas térmicas para no incrementar la complejidad del modelo.

Finalmente, si se desea estimar la potencia térmica necesaria para la refrigeración, una vez conocido el total de calor liberado durante la fermentación, puede calcularse mediante:

$$P_f = \frac{Q_f}{t_f} \quad \text{Ecuación 49}$$

- **Maduración:** En este proceso, se somete a la cerveza a un descenso controlado de temperatura desde 10 °C hasta 0 °C, que tiene como fin reducir la actividad biológica residual y favorecer la sedimentación de partículas en suspensión. Este enfriamiento requiere evacuar una cantidad determinada de energía térmica del sistema, la cual puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{mad}} = m_{\text{mad}} \cdot C_{p_{\text{mad}}} \cdot (T_{\text{mads}} - T_{\text{made}}) \quad \text{Ecuación 50}$$

Y la potencia:

$$P_{\text{mad}} = \frac{Q_{\text{mad}}}{t_{\text{mad}}} \quad \text{Ecuación 51}$$

- **Almacenamiento:** Tras la maduración, la cerveza entra en el tanque de almacenamiento a una temperatura de 0 °C, mientras que la temperatura objetivo para esta etapa es de 2 °C. Por lo tanto, será necesario aportar calor al sistema para alcanzar dicha temperatura. No obstante, debido a las pérdidas térmicas (en este caso, ganancias térmicas desde el entorno hacia el interior del tanque), se puede aprovechar parte de ese calor que entra desde el ambiente para elevar la temperatura del producto de

forma pasiva.

Durante la guarda, el tanque permanece en condiciones controladas y aisladas, aun así, se producen pequeñas ganancias de calor, que pueden utilizarse para alcanzar los 2 °C sin necesidad de calefacción activa. Una vez alcanzada esta temperatura, será necesario mantenerla constante, compensando únicamente las pérdidas de calor que tiendan a reducir la temperatura del producto. Las ecuaciones utilizadas se muestran a continuación:

$$Q_{\text{subida}} = m_{28} \cdot c_{p28} \cdot (2 - 0) \quad \text{Ecuación 52}$$

Se ha asumido que la velocidad de ganancia térmica se traduce en una variación de temperatura de 0,5 °C por hora. La potencia térmica asociada a esta ganancia es:

$$P_{\text{Ganancias}} = m_{28} \cdot c_{p28} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 53}$$

Siendo $\Delta t = 3.600\text{s}$.

Multiplicando esta potencia por el tiempo de almacenamiento t , se obtiene el calor total entrante:

$$Q_{\text{Ganancias}} = P_{\text{Ganancias}} \cdot t_{\text{Alm}} \quad \text{Ecuación 54}$$

Finalmente, el calor que debe aportarse activamente para lograr el aumento de temperatura en un tiempo t viene dado por la diferencia entre el calor total necesario y las ganancias naturales:

$$Q_{\text{Neto}} = Q_{\text{Subida}} - Q_{\text{Ganancias}} \quad \text{Ecuación 55}$$

Y la potencia neta se calcula como:

$$P_{\text{Neta}} = \frac{Q_{\text{Neto}}}{t_{\text{Alm}}} \quad \text{Ecuación 56}$$

Dado que el proceso de producción está escalonado y se produce un lote por semana gracias al trabajo en paralelo de los fermentadores, se ha estimado un tiempo de almacenamiento de 3 días (259.200 s). En este periodo, se estabiliza la temperatura de la cerveza hasta 2 °C antes del envasado. El análisis muestra que el calor ganado naturalmente desde el entorno es suficiente para elevar la temperatura, e incluso supera el valor requerido, por lo que no es necesario un aporte activo de calor, sino una ligera refrigeración para mantener los 2 °C constantes.

Los resultados obtenidos del balance de energía para cada una de las etapas del proceso se resumen en la tabla siguiente. Este balance, realizado bajo condiciones operativas representativas, permite cuantificar las demandas térmicas (positivas o negativas) asociadas a cada operación unitaria. Dichos resultados, junto con los del balance de materia, serán fundamentales para el dimensionado y selección de los equipos térmicos implicados.

Tabla 5-10. Resultados del balance de energía

Etapas	Calor (kJ)	Potencia (kW)
Macerado	334.330,8099	92,8697
Cocción1	183.106,7033	33,9086
Cocción2	581.163,1168	107,6228
Cocción	764.269,8200	141,5314
Enfriado	-519.786,7706	-288,7704
Fermentación	-57.883,2900	-0,0957
Maduración	-63.168,4929	-0,1044
Almacenamiento	-208.483,7727	-0,8043

5.4 Dimensionado de los equipos principales

En este capítulo se procede al dimensionado técnico de los equipos principales que formarán parte de la planta de producción para la elaboración de cerveza artesana sin gluten. El dimensionado correcto es un aspecto fundamental en el diseño de cualquier instalación industrial.

5.4.1 Molino

El molino de malta es el primer eslabón del proceso de extracción de mosto. Para cumplir con la producción requerida, se deben moler 450 kg en 30 minutos, eso equivale a:

$$\frac{450 \text{ kg}}{0,5 \text{ h}} = 900 \text{ kg/h} \quad \text{Ecuación 57}$$

El molino elegido es un equipo profesional de dos rodillos ajustables, fabricado en acero inoxidable, diseñado para su uso en microcervecerías. Los rodillos permiten regular la separación entre ellos para adaptarse a distintos tipos de malta y conseguir el grado de molienda óptimo.

Las especificaciones técnicas se muestran a continuación:

Tabla 5-11. Datos molino de malta

Tipo de molino	Rodillos (2 unidades, ajustables)
Material de rodillos	Acero inoxidable
Capacidad de molienda	900-1.100 kg/h
Potencia del motor	5,5 kW
Alimentación eléctrica	Trifásica - 400 V
Dimensiones aproximadas	650 · 600 · 550 mm (Largo x Ancho x Alto)
Peso	150-180 kg
Capacidad de tolva	50-75 kg, ampliable
Soporte	Sí

5.4.2 Recipiente de maceración

En esta planta, el volumen de mosto a manejar en cada lote de producción es de 1.981,49 litros, lo que implica la necesidad de un recipiente de capacidad útil igual o superior, teniendo en cuenta además un margen de seguridad para evitar desbordamientos, agitación del volumen y espacio para el bagazo.

Por tanto, se ha seleccionado un recipiente de maceración de 2.000 litros de capacidad útil, con volumen total aproximado de 2.400 litros, que permite trabajar con seguridad en cada cocción. Este recipiente está construido en acero inoxidable AISI 304, con acabado pulido sanitario para facilitar la limpieza y evitar acumulaciones de materia orgánica. Incorpora:

- Sistema de agitación motorizado, mediante rascadores de acero inoxidable.
- Chaqueta térmica para calentamiento por vapor.
- Sensor de temperatura digital y control automático.

- Tapa superior abatible para carga de malta, y válvula de descarga.

Para asegurar el funcionamiento eficiente del equipo, se estima una expansión del volumen por agitación, espuma y temperatura, por lo que se aplica un margen de seguridad del 20 %.

$$\text{Volumen requerido} = 1.981,49 \text{ L} \cdot 1,2 = 2.377,79 \text{ L} \quad \text{Ecuación 58}$$

Para definir las dimensiones internas del tanque, se parte del modelo geométrico de un cilindro, dado que es el diseño habitual en la industria cervecera para este tipo de recipientes. El volumen cilíndrico se calcula con la fórmula:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot H \quad \text{Ecuación 59}$$

Donde V es el volumen en metros cúbicos, D es el diámetro interior del tanque en metros y H es la altura del tanque en metros.

Con la necesidad de un volumen útil de 2400 litros (2,4 m³) y con el fin de obtener un diseño funcional y práctico, se ha adoptado una relación altura-diámetro comúnmente utilizada en la industria de:

$$H = 1,5 \cdot D \quad \text{Ecuación 60}$$

Esto permite un tanque relativamente compacto y con buena relación superficie-volumen para facilitar el calentamiento y la agitación. Reemplazando H en la fórmula del volumen:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot 1,5 \cdot D = \frac{1,5 \cdot \pi}{4} \cdot D^3 \quad \text{Ecuación 61}$$

Despejando D:

$$D^3 = \frac{4 \cdot 2,4}{1,5 \cdot \pi} = 2,037 \text{ m}^3 \rightarrow D = 1,27 \text{ m} \quad \text{Ecuación 62}$$

Y la altura queda:

$$H = 1,5 \cdot 1,27 = 1,90 \text{ m} \quad \text{Ecuación 63}$$

Estas dimensiones (diámetro interior de 1,27 metros y altura de 1,90 metros) proporcionan un volumen útil de 2.400 litros, suficiente para cubrir el volumen de mosto necesario con margen de seguridad y sin contar los fondos curvos del tanque.

El sistema de calentamiento se basa en una chaqueta exterior con vapor saturado a 2 bar, que transfiere calor de forma indirecta al mosto. Este método permite calentar la mezcla desde 25 °C hasta 67 °C. El Q necesario en esta etapa es de 33.4330,81 kJ (92,87 kW). Para calcular el área de intercambio térmico requerida se utiliza la expresión:

$$Q(kW) = U \cdot A \cdot F \cdot DTLM \quad \text{Ecuación 64}$$

Donde:

Q es el calor que se transfiere, U es el coeficiente global de transferencia de calor típico para camisas de vapor con paredes de acero inoxidable (0,7 kW/m²K), F es el factor de corrección adimensional para camisas de vapor con flujo no ideal y DTLM es la diferencia de temperatura media logarítmica.

Los datos utilizados en el cálculo son:

- Presión del vapor saturado: 2 bar
- Temperatura del vapor saturado: 120 °C
- Mosto de entrada: 25 °C
- Mosto de salida: 67 °C

Por tanto:

$$\Delta T_1 = 120 - 67 = 53 \text{ K} \quad \text{Ecuación 65}$$

$$\Delta T_2 = 120 - 25 = 95 \text{ K} \quad \text{Ecuación 66}$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{95 - 53}{\ln \frac{95}{53}} = 71,97 \text{ K} \quad \text{Ecuación 67}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de transferencia:

$$A = \frac{92,8697}{0,7 \cdot 1 \cdot 71,97} = 1,84 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 68}$$

La superficie lateral del cilindro, donde se coloca la chaqueta térmica, es:

$$A = \pi \cdot D \cdot H = \pi \cdot 1,27 \cdot 1,9 = 7,58 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 69}$$

Esto significa que solo se necesita cubrir aproximadamente el 25 % del área lateral con la chaqueta de vapor para alcanzar la potencia requerida. Aunque en este cálculo no se han considerado pérdidas térmicas, en la realidad existen pequeñas variaciones debido a la transferencia de calor al ambiente y condiciones no ideales del proceso. Por eso, es aconsejable sobredimensionar el área de la chaqueta térmica más allá del 25 % calculado, garantizando así un calentamiento constante y eficiente bajo diferentes condiciones operativas.

Para calcular la masa de vapor necesaria, usamos la fórmula:

$$m_{\text{vap}} = \frac{Q}{\Delta h} \quad \text{Ecuación 70}$$

Donde: m_{vap} = masa de vapor (kg), Q = energía requerida (kJ) y Δh = entalpía de vaporización del vapor a la presión de operación (kJ/kg). Utilizando las propiedades del agua en Excel se sabe que $\Delta h = 2706,24 \text{ kJ/kg}$. De modo que:

$$m_{\text{vap}} = \frac{334330,8099}{2706,24} = 123,54 \text{ kg (2 bar, 120°C)} \quad \text{Ecuación 71}$$

Asumiendo un rendimiento del 75 %, la masa real de vapor necesaria es:

$$m_{\text{real vap}} = \frac{123,54}{0,75} = 164,72 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 72}$$

Los datos técnicos se muestran a continuación:

Tabla 5-12. Datos del recipiente de macerado

Capacidad útil	2.000 L
Capacidad total	2.400 L aprox.
Material	Acero inoxidable AISI 304
Calentamiento	Chaqueta térmica (vapor)
Agitación	Motorizada con rascadores
Sensor de temperatura	Digital, con control automático
Limpieza	CIP integrado
Diámetro	1,27 m
Altura	1,9 m

5.4.3 Hervidor con sistema Whirlpool

En este proyecto, se requiere hervir un volumen de 1480,34 litros de mosto por lote, por lo que se ha optado por un hervidor con capacidad útil de 2000 litros, lo que otorga margen para ebullición activa sin riesgo de derrames,

espumas ni sobrepresión.

La paila está fabricada igualmente en acero inoxidable AISI 304, con acabado sanitario, y cuenta con:

- Entrada tangencial inferior para generar el remolino en modo Whirlpool.
- Tapa superior abatible para la adición del lúpulo.
- Sistema de calentamiento por chaqueta térmica, adecuado para vapor.
- Sensor de temperatura y válvula de sobrepresión.
- Sistema de limpieza CIP, adaptado a altas temperaturas.

Se requiere espacio adicional para evitar desbordes y para la formación del remolino durante el efecto Whirlpool. Se aplica un margen de seguridad del 25 %:

$$Volumen\ requerido = 1.480,34\ L \cdot 1,25 = 1.850,43\ L \quad \text{Ecuación 73}$$

Para definir las dimensiones internas del tanque, se sigue el mismo procedimiento que para el recipiente de macerado. Sabemos:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot 1,5 \cdot D = \frac{1,5 \cdot \pi}{4} \cdot D^3 = 2\ m^3 \quad \text{Ecuación 74}$$

Despejando D y sustituyendo en H:

$$D = 1,2\ m$$

$$H = 1,8\ m$$

Estas dimensiones (diámetro interior de 1,2 metros y altura de 1,8 metros) proporcionan un volumen útil de 2.000 litros, suficiente para cubrir el volumen de mosto necesario con margen de seguridad y sin contar los fondos curvos del tanque.

El sistema de calentamiento se basa en una chaqueta exterior con vapor saturado a 2 bar. Con ello, se permite el calentamiento de la mezcla desde 67 °C hasta 98 °C. El Q necesario en esta etapa es de 764.269,82 kJ (141,5314kW). Para calcular el área de intercambio térmico requerida se utiliza la expresión 65.

Los datos utilizados en el cálculo son:

- Presión del vapor saturado: 3 bar
- Temperatura del vapor saturado: 133,5 °C
- Mosto de entrada: 67 °C
- Mosto de salida: 98 °C

Por tanto:

$$\Delta T_1 = 133,5 - 98 = 35,5\ K \quad \text{Ecuación 75}$$

$$\Delta T_2 = 133,5 - 67 = 66,5\ K \quad \text{Ecuación 76}$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{35,5 - 66,5}{\ln \frac{35,5}{66,5}} = 49,39\ K \quad \text{Ecuación 77}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de transferencia:

$$A = \frac{141,53}{0,7 \cdot 1 \cdot 49,39} = 4,09\ m^2 \quad \text{Ecuación 78}$$

La superficie lateral del cilindro, donde se coloca la chaqueta térmica, es:

$$A = \pi \cdot D \cdot H = \pi \cdot 1,2 \cdot 1,8 = 6,79\ m^2 \quad \text{Ecuación 79}$$

Esto significa que solo se necesita cubrir aproximadamente el 61 % del área lateral con la chaqueta de vapor para alcanzar la potencia requerida.

Para calcular la masa de vapor necesaria, usamos la Ecuación 71.

$$m_{\text{vap}} = \frac{764269,82}{2163,44} = 353,27 \text{ kg (3 bar, 133,5 °C)} \quad \text{Ecuación 80}$$

Asumiendo un rendimiento del 75 % la masa real de vapor será:

$$m_{\text{real vap}} = \frac{353,27}{0,75} = 471,03 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 81}$$

Los datos técnicos se muestran a continuación:

Tabla 5-13. Datos de la paila de hervor Whirlpool

Capacidad útil	1.500 L
Capacidad total	2.000 L aprox.
Material	Acero inoxidable AISI 304
Calentamiento	Chaqueta térmica (vapor)
Sensor de temperatura	Digital, con control automático
Limpieza	CIP integrado
Diámetro	1,2 m
Altura	1,8 m

5.4.4 Intercambiador de placas

El fluido de enfriamiento es agua glicolada (50-50 de etilenglicol y agua) a -5 °C, que es suficientemente frío para llevar el mosto a 10 °C en un solo paso. Su capacidad calorífica es de aproximadamente 3,5 kJ/kgK.

La LMTD se calcula considerando las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos:

- Mosto: entra a 98 °C y sale a 10 °C.
- Agua glicolada: entra a -5 °C y sale a 0 °C.

$$\Delta T_{1int} = 98 - 0 = 98 \text{ K} \quad \text{Ecuación 82}$$

$$\Delta T_{2int} = 10 - (-5) = 15 \text{ K} \quad \text{Ecuación 83}$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{98 - 15}{\ln \frac{98}{15}} = 44,22 \text{ K} \quad \text{Ecuación 84}$$

El área necesaria para extraer 519786,77 kJ (288,77 kW) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{U \cdot F \cdot DTLM} = \frac{288,77}{2 \cdot 1 \cdot 44,22} = 3,27 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 85}$$

Los valores típicos de U oscilan entre 1-4 kW/m²K, se ha escogido 2 kW/m²K como valor intermedio.

Asumiendo una placa estándar con 0,25 m² de superficie:

$$N = \frac{3,27}{0,25} = 14 \text{ placas} \quad \text{Ecuación 86}$$

Para calcular la masa de agua glicolada se recurre a la Ecuación 88.

$$Q_{\text{enfriado}} = m_{\text{glicol}} \cdot C_{p\text{glicol}} \cdot \Delta T_{\text{glicol}} \rightarrow m_{\text{glicol}} = \frac{519.786,77}{3,5 \cdot 5} = 29.702 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 87}$$

El caudal másico sería:

$$m_{\text{glicol}}(kg/s) = \frac{29.702}{1.800} = 16,5 \text{ kg/s} \quad \text{Ecuación 88}$$

Tabla 5-14. Datos del intercambiador de placas

Tipo de intercambiador	De placas desmontable, flujo en contracorriente
N.º de placas estimado	14 placas (de 0,25 m ² por placa)
Material de placas	Acero inoxidable AISI 316
Material de juntas	EPDM alimentario (CIP compatible)
Conexiones	Roscadas
Temperatura máxima de trabajo	120 °C

5.4.5 Fermentadores

El fermentador debe permitir tanto la fermentación principal como la etapa de maduración (guarda) en el mismo equipo. Se diseñarán dos fermentadores que trabajen en paralelo y alternadamente.

El fermentador debe contener completamente los 1.545,25 L de mosto, pero además debe tener espacio libre adicional en la parte superior para la formación de espuma durante la fermentación. Por diseño higiénico y de seguridad, se suele dejar un 20% de volumen libre.

Por tanto, el volumen útil requerido se calcula como:

$$V_{\text{útil}} = \frac{1.545,25}{0,8} = 1.931,56 \text{ L} \quad \text{Ecuación 89}$$

Este es el volumen de líquido que se podrá cargar en el fermentador sin riesgo de derrame ni sobrepresión.

El volumen útil no representa la totalidad del volumen del tanque, ya que este incluye zonas no siempre llenas como el cono inferior. En fermentadores troncocónicos, se suele considerar que el volumen útil corresponde aproximadamente al 85% del volumen total geométrico.

$$V_{\text{geom}} = \frac{V_{\text{útil}}}{0,85} = \frac{1.931,56}{0,85} = 2.272,42 \text{ L} \quad \text{Ecuación 90}$$

Se ha seleccionado un fermentador troncocónico, con un cono inferior de 60° de inclinación (ángulo común para facilitar el desprendimiento de levaduras) y una parte superior cilíndrica.

Para mantener un cono con ángulo de 60°, usamos la relación geométrica entre radio y altura del cono:

$$\tan(60) = \frac{R}{h_{\text{cono}}} \rightarrow h_{\text{cono}} = \frac{R}{\sqrt{3}} = 0,577 \cdot R \quad \text{Ecuación 91}$$

Se supone un diámetro máximo de 1,2 m.

El volumen del cono se expresa como:

$$V_{\text{cono}} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot h_{\text{cono}} = \frac{0,577 \cdot \pi}{3} \cdot R^3 = \frac{0,577 \cdot \pi}{3} \cdot 0,6^3 = 0,1305 \text{ m}^3 \quad \text{Ecuación 92}$$

El volumen restante debe ser contenido por la parte cilíndrica:

$$V_{\text{cil}} = V_{\text{tot}} - V_{\text{cono}} = 2,2724 - 0,1305 = 2,1419 \text{ m}^3 \quad \text{Ecuación 93}$$

Se calcula su altura a partir del volumen y el radio conocido:

$$V_{cil} = \pi \cdot R^2 \cdot h_{cil} \rightarrow h_{cil} = 1,8939 \text{ m} \quad \text{Ecuación 94}$$

La altura total del fermentador queda:

$$h_{tot} = h_{cil} + h_{cono} = 1,89 + 0,35 = 2,24 \text{ m} \quad \text{Ecuación 95}$$

Tabla 5-15. Datos de los fermentadores

Capacidad útil	1.931,56 L
Capacidad teórica	2.272,42 L
Altura total	2,24 m
Altura cono	0,35 m
Altura cilindro	1,89 m
Diámetro interior	1,2 m
Diámetro exterior	1,3 m
Presión de trabajo (isobárica)	2,5 bar
Número fermentadores	2

Durante las etapas de fermentación y maduración, es necesario controlar térmicamente el contenido del fermentador para asegurar condiciones óptimas de operación. Para ello, se ha incorporado un sistema de refrigeración mediante camisa externa, que permite el paso de un fluido refrigerante (agua glicolada al 50 %) alrededor del cuerpo del fermentador.

- Fermentación: se mantiene el mosto a 0 °C durante 7 días. La reacción genera un calor total de 57.883,29 kJ, lo que equivale a una potencia continua de 0,0957 kW.
- Maduración: se enfría el producto desde 10 °C hasta 0 °C, también durante 7 días, extrayendo un total de 63.168,49 kJ, correspondientes a una potencia térmica de 0,1044 kW.

Para disipar este calor, se hace circular agua glicolada con las siguientes características: T_e (-5°C), T_s (0°C), ΔT (5°C), C_p (3,5 kJ/kgK).

Con estos datos se calcula el caudal másico de glicol necesario para cada etapa:

$$\dot{m}_{glicol \text{ ferm}} = \frac{0,0957}{3,5 \cdot 5} = 0,0055 \text{ kg/s} \quad \text{Ecuación 96}$$

$$\dot{m}_{glicol \text{ mad}} = \frac{0,1044}{3,5 \cdot 5} = 0,006 \text{ kg/s} \quad \text{Ecuación 97}$$

5.4.6 Tolva de recepción de malta

Para el diseño y dimensionamiento de la tolva, se ha considerado una capacidad de recepción de 450 kg de malta. La densidad aparente utilizada para el cálculo fue de 600 kg/m³, valor típico para malta molida en procesos cerveceros, considerando condiciones estándar de humedad y compactación.

Con esta información, se puede calcular el volumen necesario para almacenar esos 450 kg:

$$V_{tolva} = \frac{m}{\rho} = \frac{450}{600} = 0,75 \text{ m}^3 \quad \text{Ecuación 98}$$

Para garantizar un margen de seguridad durante la carga y evitar sobrellenos, se ha considerado un volumen útil un 10% mayor que el volumen estrictamente necesario.

El diseño de la tolva sigue un esquema similar al utilizado en los fermentadores descritos anteriormente, aplicando las mismas fórmulas y principios geométricos para tanques troncocónicos. En este sentido, se ha considerado que el volumen útil representa aproximadamente el 85% del volumen total geométrico, lo que permite calcular el volumen total necesario para la tolva.

La tolva se ha diseñado con un cono inferior inclinado a 60°, un valor habitual que facilita la descarga y evita atascos. El diámetro máximo se ha fijado en 1 m para adecuarse a las necesidades espaciales y operativas.

Las dimensiones del cono y la parte cilíndrica se han determinado mediante la aplicación de las fórmulas geométricas detalladas en el apartado de fermentadores, adaptándolas al tamaño y volumen requerido para la tolva.

En la siguiente tabla se recogen los resultados:

Tabla 5-16. Datos de la tolva de malta

Capacidad de malta	450 kg
Densidad aparente	0,6 kg/L
Volumen necesario	0,75 m ³
Volumen útil (10% extra)	0,825 m ³
Volumen total geométrico	0,97 m ³
Diámetro máximo	1 m
Altura del cono (60°)	0,288 m
Volumen del cono	0,075 m ³
Volumen parte cilíndrica	0,905 m ³
Altura parte cilíndrica	1,15 m
Altura total tolva	1,44 m

5.4.7 Tanques de almacenamiento de cerveza

De forma similar al caso de los fermentadores, se diseña un conjunto de tanques de almacenamiento cilíndricos verticales, destinados a conservar la cerveza tras la maduración, previo a su envasado. Estos tanques deben asegurar que el producto se mantenga a una temperatura máxima de 2 °C, considerando que la cerveza sale de maduración a 0 °C y absorbe calor del ambiente durante el almacenamiento.

Para el dimensionamiento volumétrico de los tanques, se parte de una capacidad de 1500 litros (1,5 m³) por tanque, ajustada a la estrategia de producción y distribución.

La geometría se basa en un cuerpo cilíndrico vertical, con radio fijado para simplificar el diseño.

La relación geométrica básica es:

$$V_{cil} = \pi \cdot R^2 \cdot h_{tanque} \rightarrow h_{tanque} = \frac{1,5}{\pi \cdot 0,5^2} = 1,91 \text{ m} \quad \text{Ecuación 99}$$

Suponiendo un radio interior de 0,5 m (diámetro interior de 1 m), se despeja la altura necesaria.

Para controlar térmicamente el sistema, se incorpora una camisa de refrigeración externa por la que circula agua glicolada al 50 %, a temperaturas entre -5 °C (entrada) y 0 °C (salida). Este sistema permite mantener la cerveza dentro del rango deseado al compensar la ganancia térmica durante el almacenamiento.

Durante los tres días de almacenamiento (259.200 s), se debe extraer una cantidad total de calor de 0,8043 kW.

El diseño térmico se realiza usando el modelo F-DTLM, aplicando la ecuación de transferencia de calor:

$$A = \frac{Q}{U \cdot F \cdot DTLM} = \frac{0,8043}{0,3 \cdot 1 \cdot 5,94} = 0,45 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 100}$$

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{7 - 5}{\ln \frac{7}{5}} = 5,94 \text{ K} \quad \text{Ecuación 101}$$

El área lateral de un cilindro se calcula como:

$$A_{lat} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h_{tanque} = 2 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 1,91 = 6 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 102}$$

Por tanto, el área requerida representa solo un 7,5 % del área lateral del tanque, lo cual es fácilmente alcanzable con una camisa parcial o seccional en la parte inferior.

Con estos datos se calcula el caudal másico de glicol necesario en esta etapa:

$$\dot{m}_{glicol \text{ alm}} = \frac{0,8043}{3,5 \cdot 5} = 0,046 \text{ kg/s} \quad \text{Ecuación 103}$$

A continuación, se muestran los datos técnicos:

Tabla 5-17. Datos de tanque de almacenamiento de cerveza

Producto almacenado	Cerveza post-maduración
Volumen útil de almacenamiento	1.500 L (1,5 m³)
Configuración	Cilíndrico vertical, fondo plano
Material de construcción	Acero inoxidable AISI 304 (grado alimentario)
Diámetro interior	1 m
Altura útil	1,91 m
Espesor de pared	3 mm
Temperatura de operación	0 °C a 2 °C
Sistema de refrigeración	Camisa externa de enfriamiento
Área activa de la camisa	0,19 m²
Refrigerante	Agua glicolada al 50 %
Coef. global de transferencia (U)	300 W/m²·K
Tipo de aislamiento externo	Lana mineral o poliuretano expandido
Número de unidades	2

5.4.8 Tanque de dosificación de tierras diatomeas (+ filtro)

El sistema de filtración de la cerveza sin gluten se basa en la utilización de tierras de diatomeas como medio filtrante auxiliar. Este proceso requiere de dos elementos clave: el tanque de dosificación, que prepara y mantiene la suspensión de tierras, y el filtro prensa, que realiza la separación física de las partículas en suspensión. El tanque de dosificación de tierras de diatomeas es un equipo auxiliar cuya función es preparar, homogeneizar y dosificar una suspensión de tierras en agua hacia el flujo de cerveza previo a su paso por el filtro. La agitación constante evita la sedimentación de las partículas y permite una dosificación continua y controlada durante todo el proceso.

Para el diseño del tanque se ha considerado el volumen de cerveza a filtrar por lote: 1.545,25 L. La dosificación habitual de tierras de diatomeas en microcervecías oscila entre 0,5 y 1,5 g/L. Se ha adoptado una dosificación de 1 g/L, por lo que se requiere:

$$m_{diatomeas} = 1.545,25 \text{ L} \cdot 1 \text{ g/L} = 1,545 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 104}$$

Esta cantidad se mezcla con agua para formar una suspensión con una concentración típica del 7 % en peso, lo que implica:

$$m_{mezcla} = \frac{1,545}{0,07} = 22,07 \text{ kg} \rightarrow V_{mezcla} \approx 22 \text{ L} \quad \text{Ecuación 105}$$

Para asegurar una agitación adecuada y disponer de un margen operativo suficiente, se ha duplicado este volumen, seleccionando un tanque de 50 L de capacidad útil.

Las características técnicas del tanque son:

Tabla 5-18. Datos del tanque de tierras diatomeas

Capacidad útil	50 L
Material	Acero inoxidable AISI 304
Agitación	Mecánica, eje con hélice
Alimentación eléctrica	230 V / 50 Hz
Tipo de tapa	Abatible, cierre hermético
Dimensiones aproximadas (L x A x H)	0,35x 0,35 x 0,4 m

Una vez mezclada la suspensión, esta se inyecta en el flujo de cerveza para formar una capa filtrante sobre las placas del filtro prensa. Este sistema permite retener levaduras, proteínas y turbidez.

Se ha seleccionado un modelo que permite un caudal de hasta 1.400 L/h, superior al necesario para un lote de 1.545,25 L, considerando una duración de filtración de aproximadamente 120 minutos:

$$Q = \frac{1.545,25 \text{ L}}{2 \text{ h}} = 772,6 \text{ L/h} \quad \text{Ecuación 106}$$

Este caudal representa un 55 % de la capacidad máxima del equipo, operando dentro de márgenes eficientes y seguros. Las características técnicas del filtro son:

Tabla 5-19. Datos del filtro prensa

Caudal máximo de filtración	1.400 L/h
Superficie filtrante total	2 m ²
Presión máxima de trabajo	6 atm
Potencia instalada	3,25 kW
Alimentación eléctrica	400 V / 50 Hz
Material placas	AISI 304, malla AISI 316 (80 µm)
Dimensiones (L x A x H)	1,65 x 0,9 x 1,71,m
Peso en vacío	200 kg

5.4.9 Filtro prensa

Para el diseño y selección del filtro prensa que se utilizará en la clarificación del mosto, se partió de datos reales del proceso. El volumen total de mosto a filtrar es de aproximadamente 1.981,5 litros, con una masa de sólidos (bagazo) de 247,5 kg que se deben separar para obtener un mosto limpio. El volumen esperado de mosto filtrado tras la separación es de unos 1.741,6 litros. Además, el tiempo máximo para completar la filtración se ha establecido en 120 minutos, es decir, dos horas.

Con estos datos, se ha calculado el caudal necesario para cumplir con el tiempo máximo. Dividiendo el volumen total de mosto por el tiempo en horas, obtenemos el caudal mínimo requerido para el equipo:

$$Q = \frac{1.981,5 L}{2 h} = 990,75 L/h \quad \text{Ecuación 107}$$

Esto significa que el filtro prensa debe tener una capacidad nominal igual o superior a 990,75 L/h para garantizar que la filtración no limite la producción.

Para mantener coherencia y facilitar el mantenimiento, se ha elegido el mismo modelo de filtro prensa utilizado en el tanque de dosificación de tierras diatomeas, que tiene una capacidad nominal de 1.400 L/h, suficiente para cubrir ambos caudales con un margen de seguridad.

5.4.10 Caldera

Para el correcto dimensionado de la caldera es imprescindible conocer la energía térmica que será requerida por el sistema en sus distintas etapas operativas. En este caso, se identifican dos procesos que necesitan aporte de energía térmica mediante vapor: la etapa de macerado y la etapa de cocción.

A partir de los cálculos realizados, se ha determinado que:

- En la etapa de macerado, se requiere una masa real de vapor de 164,72 kg a una presión de 2 bar y temperatura de 120 °C, lo que corresponde a una entalpía específica del vapor de 2.201,56 kJ/kg.
- En la etapa de cocción, se requiere una masa real de vapor de 471,03 kg, esta vez a una presión de 3 bar y temperatura de 133,5 °C, con una entalpía específica de 2.163,44 kJ/kg.

La energía térmica necesaria para cada etapa se calcula mediante la ecuación:

$$Q = m \cdot h \quad \text{Ecuación 108}$$

Así, se obtienen los siguientes valores:

$$Q_{mac} = 164,72 kg \cdot 2.201,56 kJ/kg = 362.640,97 kJ \quad \text{Ecuación 109}$$

$$Q_{coc} = 471,03 \text{ kg} \cdot 2.163,44 \text{ kJ/kg} = 1.019.045,14 \text{ kJ} \quad \text{Ecuación 110}$$

Dado que ambas etapas no se realizan de forma simultánea, se considera como caso más desfavorable la etapa que requiere mayor aporte energético, en este caso la cocción. Para conocer la potencia térmica que debe entregar la caldera, se parte del supuesto de que esta energía debe suministrarse en el transcurso de una hora (3.600 s):

$$P_{teórica} = \frac{Q}{t} = \frac{1.019.045,14}{3.600} = 283,07 \text{ kW} \quad \text{Ecuación 111}$$

Teniendo en cuenta un rendimiento del 90 %, la potencia real que debe generar se ajusta mediante:

$$P_{real} = \frac{P_{teórica}}{\eta} = \frac{283,07}{0,9} = 314,52 \text{ kW} \quad \text{Ecuación 112}$$

Este valor representa la potencia mínima que debe tener la caldera para asegurar el funcionamiento eficiente del proceso en su etapa más exigente.

Se ha considerado el uso de huesos de aceituna como biocombustible alternativo. Esta opción presenta ventajas significativas tanto desde el punto de vista ambiental como económico, especialmente en regiones donde se genera este subproducto de manera abundante (como zonas oleícolas del Mediterráneo). Entre sus ventajas destacan:

- Es un residuo agrícola con bajo coste y alta disponibilidad.
- Posee un alto poder calorífico inferior (PCI), en torno a 18.000 kJ/kg.
- Su uso contribuye a la economía circular y a la reducción de residuos.
- Genera bajas emisiones de CO₂ neto, al tratarse biomasa.

Para obtener la masa necesaria se sigue la siguiente ecuación:

$$m_{hueso} = \frac{P_{real}}{PCI \cdot \eta} = \frac{314,52 \text{ kW} \cdot 3.600 \text{ s}}{18.000 \text{ kJ/kg} \cdot 0,9} = 68,89 \text{ kg/h} \quad \text{Ecuación 113}$$

Tabla 5-20. Datos de la caldera de biomasa

Potencia térmica nominal	315 kW
Combustible	Huesos de aceituna
Poder calorífico inferior (PCI)	18.000 kJ/kg
Eficiencia térmica	90 %
Dimensiones estimadas (L x A x H)	4,5 x 1,3 x 2,4 m
Consumo de combustible	69 kg/h (aprox.)
Tipo de quemador	Quemador multicomcombustible rotativo modulado
Material construcción	Acero al carbono con aislamiento térmico

5.4.11 Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración ha sido diseñado para cubrir las necesidades térmicas de todo el proceso cervecero, incluyendo las etapas de enfriamiento del mosto, fermentación, maduración y almacenamiento. Se ha optado por un sistema de refrigeración indirecto mediante agua glicolada al 50 %, debido a su mayor seguridad, modularidad y facilidad de control individualizado.

La refrigeración se basa en un ciclo frigorífico por compresión de vapor, en el cual un refrigerante cambia de fase en un circuito cerrado, extrayendo calor del glicol. Este glicol enfriado (hasta aprox. -5°C) circula impulsado por bombas a través de colectores sectorizados, distribuyéndose hacia los distintos consumidores térmicos del proceso. Cada etapa cuenta con su propio sistema de control de temperatura mediante válvulas de paso.

La mayor demanda térmica del proceso corresponde a la etapa de enfriamiento del mosto, con una potencia de 288,77 kW, mientras que las cargas adicionales en fermentación (0,096 kW), maduración (0,104 kW) y almacenamiento (0,804 kW) son considerablemente menores. Considerando la carga total (aproximadamente 290 kW), se ha dimensionado un sistema frigorífico de 300 kW, con margen de seguridad.

El circuito secundario de glicol opera con un diferencial térmico de 5°C y una capacidad calorífica de $3,5 \text{ kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$. Aunque la demanda máxima de refrigeración alcanza los 16,5 kg/s durante aproximadamente 30 minutos (lo que supondría un total de 29.702 kg si fuera un solo uso), el uso de un sistema de recirculación y un tanque acumulador frío evita tener que disponer de toda esa masa a la vez.

Por tanto, con un volumen total de 400 L de solución glicolada, se asegura un funcionamiento eficiente del sistema, permitiendo atender picos de demanda sin necesidad de sobredimensionar el volumen total del circuito ni realizar una compra excesiva de glicol.

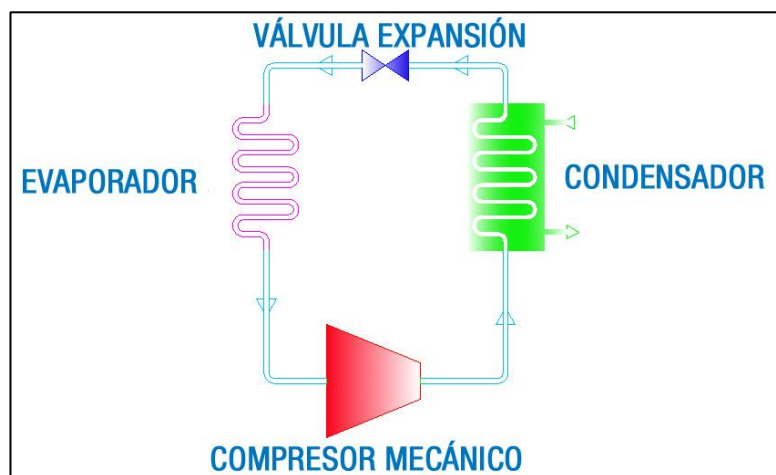


Figura 5-7. Sistema de compresión mecánica (tecnología frigorífica)

Los datos técnicos se muestran a continuación:

Tabla 5-21. Datos del equipo de refrigeración

Potencia frigorífica	300 kW
Conexión eléctrica	400 V / 50 Hz
Largo	3,85 m
Ancho	2,2 m
Alto	2,35 m

Tabla 5-22. Datos del depósito de agua glicolada

Capacidad útil	400 L
Altura	0,8 m
Radio	0,4 m
Aislamiento	Poliuretano

En conclusión, cada equipo desempeña un papel esencial a lo largo del proceso, desde la preparación de las materias primas hasta el control preciso de las condiciones térmicas, asegurando un producto final de calidad.

A continuación, se presenta una tabla que describe los principales equipos involucrados en el proceso, detallando su función, características técnicas más relevantes y el sistema energético o térmico asociado a cada uno.

Tabla 5-23. Resumen de los principales equipos del proceso

Equipo	Función	Características técnicas destacadas	Sistema energético/térmico
Molino de malta	Triturar la malta para facilitar la extracción de azúcares durante la maceración	Molino de rodillos ajustables, estructura en acero inoxidable	Motor eléctrico trifásico
Macerador	Mezclar la malta molida con agua caliente para extraer los azúcares fermentables	Diseño cilíndrico en acero inoxidable sanitario, agitación motorizada, control de temperatura automático	Chaqueta térmica con vapor saturado
Hervidor con sistema Whirlpool	Hervir el mosto y realizar el efecto de remolino para separar sólidos	Recipiente combinado para ebullición y clarificación, entrada tangencial, sensor térmico, tapa abatible	Chaqueta térmica con vapor saturado
Intercambiador de placas	Enfriar rápidamente el mosto tras la ebullición antes de la fermentación	Flujo en contracorriente, placas desmontables de acero inoxidable, juntas alimentarias, limpieza CIP compatible	Refrigeración mediante glicol
Fermentadores cilíndrico-cónicos	Fermentar y madurar la cerveza bajo condiciones controladas.	Recipientes presurizables de acero inoxidable, con camisa de refrigeración, diseño vertical cónico	Enfriamiento mediante glicol
Tolva de malta	Almacenar malta antes de la molienda	Depósito metálico con estructura cónica	Sin requerimientos energéticos directos
Tanques de almacenamiento de cerveza	Almacenar cerveza tras la maduración, lista para embotellado.	Tanques cilíndricos verticales, parcialmente refrigerados, contruidos en acero inoxidable, diseñados para conservación estable	Enfriamiento mediante glicol
Tanque de tierras diatomeas	Preparar y dosificar tierras para el filtrado de cerveza	Tanque de acero inoxidable con agitación mecánica, adecuado para mezcla homogénea y dosificación controlada	Alimentación eléctrica monofásica
Filtro prensa	Clarificar la cerveza reteniendo partículas en suspensión	Estructura robusta con placas filtrantes de acero inoxidable, presión controlada, limpieza sencilla	Motor eléctrico trifásico
Caldera de biomasa	Generar vapor para procesos térmicos como cocción	Sistema de combustión automatizada con alto rendimiento térmico, uso de combustible natural (biomasa), estructura compacta.	Combustión de biomasa / vapor saturado
Sistema de refrigeración	Refrigerar distintos equipos a través de un circuito cerrado con glicol	Compuesto por compresor condensador válvula de expansión y evaporador	Grupo frigorífico con expansión indirecta

6 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

En esta sección se hace una estimación general de los costes necesarios para desarrollar el proyecto. Para ello, se calcula el Coste Total de la Planta, que se compone del Coste Total de Inversión (CTI) y del Coste Total de Producción (CTP).

El Coste Total de Inversión representa el gasto necesario para construir y poner en marcha la planta. Para estimarlo se utiliza el método de Chilton, una herramienta común en la ingeniería de procesos que permite calcular los distintos componentes del coste a partir del valor de los equipos principales. Este método aplica factores multiplicativos que tienen en cuenta elementos como tuberías, instrumentación, edificaciones, servicios auxiliares, ingeniería, construcción, contingencias, entre otros.

Por otro lado, el Coste Total de Producción considera los gastos que implica operar la planta durante un año. Esto incluye el coste de las materias primas, la energía, la mano de obra, el mantenimiento, los servicios auxiliares y los costes generales.

Aplicando esta metodología es posible calcular de forma aproximada los recursos económicos necesarios para la construcción, puesta en marcha y operación anual de la planta. Estos datos son fundamentales para poder evaluar si el proyecto es técnica y económicamente viable.

6.1 Costes de equipos, materias primas y servicios auxiliares

6.1.1 Costes de equipos principales

Tabla 6-1. Equipos y costes unitarios

Equipos	Unidades	Coste (€/ud.)
Molino	1	2.500
Recipiente de maceración	1	8.000
Hervidor con sistema Whirlpool	1	15.200
Intercambiador de placas	1	4.000
Fermentador	2	6.000
Tolva de recepción de malta	1	500
Tanque de almacenamiento de cerveza	2	2.000
Tanque de dosificación de tierras diatomeas	1	1.000
Filtro prensa	2	1.800
Caldera	1	19.200
Sistema de refrigeración	1	10.000

6.1.2 Costes de servicios auxiliares

Tabla 6-2. Coste y cantidad consumida por cada ítem de la planta

Ítems	Coste (€/kg)	Cantidad consumida (kg/lote)
Agua glicolada al 50 %	0,75	440 (recirculación)
Hueso de aceituna	0,145	68,89
Agua para generar vapor	0,0005	636,02

6.1.3 Costes de materias primas

Tabla 6-3. Costes de materias primas por kg consumido

Materias primas	Coste (€/kg)	Cantidad consumida (kg/lote)
Malta	0,98	450
Lúpulo	27,9	1,5
Levadura	38,5	0,75
Enzima degradadora de gluten	184	0,00375
Agua tratada	0,001	1594,11

6.2 Coste total de inversión de la planta

En la siguiente tabla se muestran los diferentes tipos de costes que se tienen en cuenta para calcular el Coste Total de Inversión (CTI) usando el método de Chilton. Cada coste se obtiene mediante fórmulas que incluyen factores multiplicadores, los cuales se han seleccionado bajo un enfoque equilibrado, es decir, se ha elegido el valor medio dentro de cada rango para obtener una estimación representativa, sin caer en escenarios ni excesivamente optimistas ni conservadores.

Además, se han hecho algunas suposiciones para el proyecto: la planta será automática, los edificios y el acondicionamiento del terreno estarán en una zona interior, los equipos auxiliares se ubicarán en una pequeña ampliación de la planta, las conexiones exteriores se consideran como una sola unidad, los trabajos de ingeniería y construcción tendrán una complejidad baja, y las contingencias y beneficios del contratista se basan en un diseño que puede sufrir cambios. También se asume que la planta es de pequeño tamaño, lo que afecta el factor de escala.

Más adelante se presentan los valores concretos de esos factores multiplicadores seleccionados (tomados del Anexo III) y el cálculo detallado para obtener el coste total de inversión.

Tabla 6-4. Cálculo del coste total de inversión

Tipo de coste	Expresión	f_i	C_i (€/año)
Equipos principales	$C_1 = \sum C_{T, equipo}$	1	80.000
Equipos instalados	$C_2 = f_2 \cdot C_1$	1,8	144.000
Tuberías	$C_3 = f_3 \cdot C_2$	0,2	28.800
Instrumentación	$C_4 = f_4 \cdot C_2$	0,075	10.800
Edificios y terreno	$C_5 = f_5 \cdot C_2$	0,8	115.200
Auxiliares	$C_6 = f_6 \cdot C_2$	0,025	3.600
Líneas exteriores	$C_7 = f_7 \cdot C_2$	0,025	3.600
Coste Directo Total	$C_8 = \sum_{i=2}^7 C_i$	-	386.000
Ingeniería y construcción	$C_9 = f_9 \cdot C_8$	0,275	106.150
Contingencia y contratista	$C_{10} = f_{10} \cdot C_8$	0,25	96.500
Tamaño	$C_{11} = f_{11} \cdot C_8$	0,1	38.600
Coste Indirecto Total	$C_{12} = \sum_{i=9}^{11} C_i$	-	241.250
CTI	$CTI = C_8 + C_{12}$	-	627.250

6.3 Coste total de producción de la planta

La siguiente tabla recoge los distintos tipos de costes incluidos en la estimación del Coste Total de Producción (CTP) de la planta química. Al igual que en el caso del Coste Total de Inversión (CTI), cada componente del coste se calcula mediante fórmulas que incorporan factores multiplicativos. Estos factores han sido seleccionados bajo un enfoque equilibrado, eligiendo valores medios (ver Anexo III).

En particular, el coste de la mano de obra directa (MOD) se ha estimado usando una ecuación que considera el número de operarios requeridos por equipo ($N_{op,i} \cdot E_{q_i}$). También se ha tenido en cuenta un factor de capacidad del 85 % y un salario actualizado de 7,5 €/h.

$$M.O.D. = \sum (N_{op,i} \cdot E_{q_i}) \cdot \text{Sal} \cdot FC \cdot 2.830,5 \quad \text{Ecuación 114}$$

En este caso en concreto, se ha incorporado una estimación de 2.830,5 horas anuales de operación en continuo de la planta, ya que por cada lote se requiere la presencia de operarios durante los 330 minutos de operación activa, 120 minutos de filtración antes del envasado y una media de dos días para las etapas de fermentación y maduración donde no es necesaria una supervisión continua de los mismos.

Tabla 6-5. Cálculo del coste total de producción

Costes	Expresión	f_i	C_i (€/año)
Materias primas	-	-	25.670
Electricidad, agua de enfriamiento	-	-	845
Mantenimiento	$C_3 = f_3 \cdot CTI$	0,075	47.044
Materiales auxiliares	$C_4 = f_4 \cdot C_3$	1	47.044
Empaquetado y envío	Despreciable	-	-
Mano de obra directa (MOD)	-	-	114.989
Costes de laboratorio	$C_7 = f_7 \cdot C_6$	0,2	22.998
Supervisión	$C_8 = f_8 \cdot C_6$	0,2	22.998
Dirección en planta	$C_9 = f_9 \cdot C_6$	0,5	57.495
Cargas de capital	$C_{10} = f_{10} \cdot CTI$	0,15	94.088
Seguros	$C_{11} = f_{11} \cdot CTI$	0,01	6.273
Impuestos locales	$C_{12} = f_{12} \cdot CTI$	0,02	12.545
Royalties	$C_{13} = f_{13} \cdot CTI$	0,01	6.273
Coste de producción directo (DPC)	$C_{14} = \sum_{i=1}^{13} C_i$	-	458.260
Generales	$C_{15} = f_{15} \cdot C_4$	0,6	28.226
Gastos de administración	$C_{16} = f_{16} \cdot CTI$	0,02	12.545
Impuestos	$C_{17} = f_{17} \cdot CTI$	0,01	6.273
Seguros	$C_{18} = f_{18} \cdot CTI$	0,01	6.273
Recuperación capital	$C_{19} = f_{19} \cdot CTI$	0,01098	6.887
Coste de producción indirecto (CPI)	$C_{20} = \sum_{i=15}^{19} C_i$	-	60.203
Coste Total de producción (CTP)	CTP = DPC + CPI	-	518.463

Se ha estimado un coste de inversión inicial de 630.000 € y un coste operativo anual en torno a 520.000 €.

6.4 Índices de rentabilidad

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto de producción artesanal de cerveza sin gluten, se han calculado tres indicadores financieros clave: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (Payback). Estos indicadores se determinan a partir de los flujos netos de caja anuales (FNC) generados por el proyecto.

6.4.1 Flujos de caja

La inversión inicial estimada para la instalación de la planta asciende a 630.000 €, incluyendo maquinaria, instalaciones, adecuación del espacio y demás costes asociados al arranque. La planta está diseñada para producir 50 lotes al año, lo que equivale a una producción total de 75.000 litros anuales.

El precio de venta unitario se ha fijado en 9,85 €/litro, considerando el valor añadido que supone una cerveza artesanal sin gluten, destinada a un segmento de mercado especializado. Por ejemplo, la cerveza artesana Loira Lager, sin gluten y elaborada por Menduiña en Galicia, se vende a aproximadamente 3,25 € por botella de 33 cl, lo que equivale a cerca de 9,85 €/litro, demostrando que este precio es competitivo y acorde con cervezas de características similares.

Los costes operativos anuales ascienden a 520.000 €, incluyendo materias primas, energía, personal, logística y otros gastos recurrentes. La amortización de los equipos se ha calculado mediante el método lineal, considerando una vida útil de 10 años, lo que representa una depreciación anual de 62.725 €.

Con estos datos, el beneficio antes de impuestos (BAI) se determina mediante la siguiente fórmula:

$$BAI = Ventas - Costes - Amortización \quad \text{Ecuación 115}$$

Aplicando un tipo impositivo del 25 % sobre el BAI, se obtiene el importe de los impuestos, y finalmente el beneficio neto (BN).

$$Impuestos = BAI \cdot 0,25 \quad \text{Ecuación 116}$$

$$BN = BAI - Impuestos \quad \text{Ecuación 117}$$

Como la amortización no representa una salida real de caja, se reincorpora para obtener el flujo neto de caja (FNC):

$$FCN = BN + Amortización \quad \text{Ecuación 118}$$

Los flujos netos de caja para los diez años de análisis se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 6-6. Cálculo de los flujos de caja (FNC)

Año	Inversión	Ventas	Costes	Amortización	BAI	Impuestos	BN	FNC
0	-627250	-	-	-	-	-	-	-627250
1	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
2	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
3	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
4	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
5	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
6	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
7	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
8	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
9	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896
10	-	738750	518463	62725	157562	39390	118171	180896

6.4.2 Valor actual neto (VAN)

El Valor Actual Neto (VAN) permite conocer cuánto valor genera un proyecto al traer al presente los flujos netos de caja esperados. Es una herramienta clave para evaluar la rentabilidad de una inversión, considerando el valor temporal del dinero. La fórmula utilizada es:

$$VAN = -A + \sum_{i=1}^n \frac{FNC_i}{(1+k)^i} \quad \text{Ecuación 119}$$

Donde:

- A es la inversión inicial en €.
- FNC_i es el flujo neto de caja en el año i .
- k es la tasa de descuento con un valor estimado del 8 %.
- n es la vida útil del proyecto (10 años).

Con estos valores, el VAN resulta ser aproximadamente 590.000 €. Esto significa que, tras descontar todos los flujos de caja futuros al valor presente y restar la inversión inicial, el proyecto genera un valor neto positivo de 590.000 €. En otras palabras, no solo recupera la inversión realizada, sino que también aporta un beneficio adicional significativo por encima del coste del capital. Por tanto, el proyecto es rentable y financieramente viable, ofreciendo un retorno satisfactorio para los inversores.

6.4.3 Tasa interna de rentabilidad (TIR)

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea exactamente cero. Es un indicador de la rentabilidad interna del proyecto, calculado mediante:

$$0 = -A + \sum_{i=1}^n \frac{FNC_i}{(1+TIR)^i} \quad \text{Ecuación 120}$$

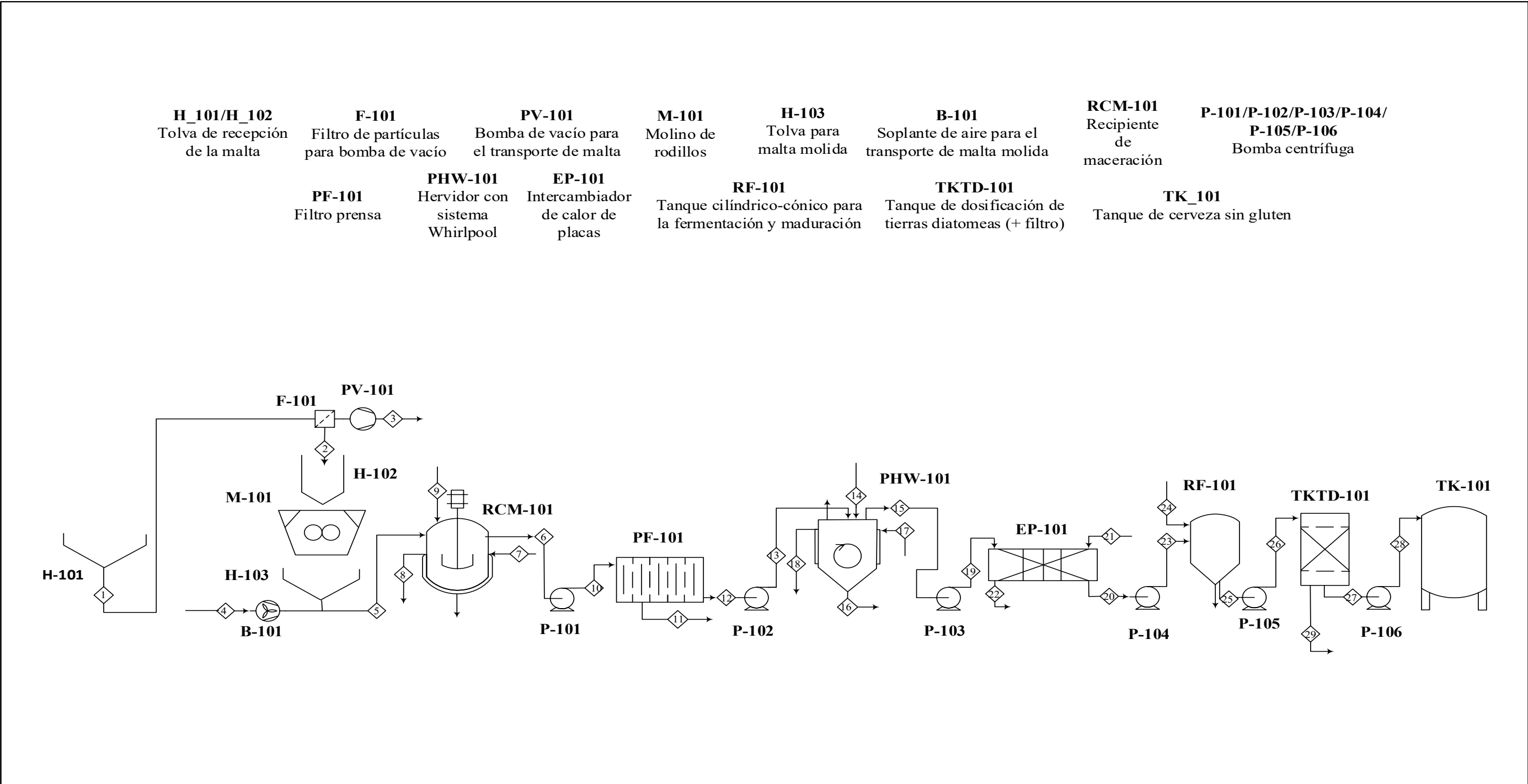
La TIR obtenida, del 26 %, supera ampliamente la tasa de descuento del 8 %, lo que indica que el proyecto ofrece una rentabilidad superior al coste del capital. Esto confirma su viabilidad económica.

6.4.4 Payback (PB)

El Payback o periodo de recuperación mide en cuántos años se recupera la inversión inicial con los flujos netos generados. Se calcula como:

$$Payback = \frac{\text{Inversión Inicial}}{FNC \text{ actual}} \quad \text{Ecuación 121}$$

En este proyecto, el periodo de recuperación estimado es de aproximadamente 3,47 años, lo que representa un plazo razonable para recuperar la inversión inicial. Este tiempo refleja un equilibrio adecuado entre el riesgo asumido y la generación de flujos de caja positivos, siendo típico en inversiones industriales de esta naturaleza.



***DIAGRAMA DE FLUJO
DE PROCESOS***



Escuela Técnica Superior de
INGENIERÍA DE SEVILLA



DEPARTAMENTO
INGENIERÍA
QUÍMICA y
AMBIENTAL

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE CERVEZA ARTESANAL SIN GLUTEN

ANEXO II. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA CERVEZA SIN GLUTEN														
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura (°C)	25	25			25	67	120	120	25	67	67	67	67	25
Presión (atm)	0,8	1,0			1,2	1,0	2,0	2,0	1,0	6,0	1,0	1,0	1,2	1,0
Masa total (kg/lote)	450,0000	450,0000			450,0016	2044,1094	164,7200	164,7200	1594,1078	2044,1094	247,5000	1796,6094	1796,6094	1,5000
Volumen (L/lote)	-	-			-	1981,4942	164,7200	164,7200	1594,1078	1981,4942	-	1741,5756	1741,5756	-
Densidad (kg/L)	0,6000	0,6000			0,6000	1,0316	1,0000	1,0000	1,0000	1,0316	-	1,0316	1,0316	-
Título de vapor	-	-			-	-	1,0000	0,0000	-	-	-	-	-	-
Componentes (kg/lote)														
Malta	450,0000	450,0000			450,0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lúpulo	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5000
Levadura	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Azúcares	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mosto	-	-			-	2044,1094	-	-	-	2044,1094	-	1796,6078	1796,6078	-
Cerveza	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bagazo de grano húmedo	-	-			-	-	-	-	-	-	247,5000	-	-	-
Residuo de lúpulo	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Levadura residual	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Agua	-	-			-	-	164,7200	164,7200	1594,1078	-	-	-	-	-

Corrientes	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Temperatura (°C)	98	98	134	134	98	10			10	25	0	0	0	2	0
Presión (atm)	1,0	1,0	3,0	3,0	1,2	1,0			1,2	1,0	2,5	6,0	1,0	1,2	1,0
Masa total (kg/lote)	1536,0000	4,5000	471,0300	471,0300	1536,0000	1536,0000			1536,0000	0,7500	1536,7500	1536,7500	1491,7500	1491,7500	45,0000
Volumen (L/lote)	1480,3392	-	471,0300	471,0300	1480,3392	1480,3392			1480,3392	-	1545,2489	1545,2489	1500,0000	1500,0000	-
Densidad (kg/L)	1,0376	-	1,0000	1,0000	1,0376	1,0376			1,0376	-	0,9945	0,9945	0,9945	0,9945	-
Título de vapor	-	-	1,0000	0,0000	-	-			-	-	-	-	-	-	-
Componentes (kg/lote)															
Malta	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-
Lúpulo	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-
Levadura	-	-	-	-	-	-			-	0,7500	-	-	-	-	-
Azúcares	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-
Mosto	1536,0000	-	-	-	1536,0000	1536,0000			1536,0000	-	-	-	-	-	-
Cerveza	-	-	-	-	-	-			-	-	1536,7500	1536,7500	1491,7500	1491,7500	-
Bagazo de grano húmedo	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-
Residuo de lúpulo	-	4,5000	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-
Levadura residual	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	45,0000
Agua	-	-	471,0300	471,0300	-	-			-	-	-	-	-	-	-

ANEXO III. CATÁLOGOS

Tabla AnxIII-1 Factores de Chilton para el coste total de inversión de la planta

Item	Factor (f _i)	Concepto	Item	Factor (f _i)	Concepto
C ₁	Coste equipos principales	1	C ₁ = $\Sigma C_{T,a}$	C ₇	Líneas exteriores • Unidad Integrada • Unidad Separada • Unidad Dispersa
C ₂	Coste equipos instalados	1,4 - 2,20	C ₂ = f ₂ · C ₁	C ₈	Coste Directo Total
C ₃	Coste de tuberías • En plantas con sólidos • En plantas mixtas • En plantas con fluidos	0,07- 0,10 0,10- 0,30 0,30-0,60	C ₃ = f ₃ · C ₂	C ₉	Ingeniería y construcción • Complejidad simple • Complejidad complicada
C ₄	Coste de instrumentación • Poca automatización • Algo de automatización • Completa automatización	0,02- 0,05 0,05- 0,10 0,10- 0,15	C ₄ = f ₄ · C ₂	C ₁₀	Contingencia y beneficio del contratista • Proceso Completado • Proceso sujeto a cambios • Proceso especulativo
C ₅	Edificios y preparación del terreno • Planta existente • Planta externa • Mixta • Interna	0 0,05- 0,20 0,20- 0,60 0,60- 1,00	C ₅ = f ₅ · C ₂	C ₁₁	Factor del tamaño • Grande • Pequeña • Planta piloto
C ₆	Auxiliares (potencia, vapor, agua) • Ninguna extensión • Pequeña ampliación • Ampliación grande • Nuevas extensión	0 0-0,05 0,05-0,25 0,25-1	C ₆ = f ₆ · C ₂	C ₁₂	Coste indirecto total
			CTF	Suma conceptos (C ₈ +C ₁₂)	

Tabla AnxIII-2. Factores de Chilton para el coste total de operación de la planta

Item	Costes	Valores típicos	Item	Costes	Valores típicos
C ₁	Materias primas	Datos del diagrama del proceso	C ₈	Supervisión	C ₈ = f ₈ · C ₆ f ₈ : 20 %
C ₂	Electricidad, vapor, agua	Según diagrama de proceso (Tabla 10)	C ₉	Dirección en planta	C ₉ = f ₉ · C ₆ f ₉ : 50 %
C ₃	Mantenimiento	C ₃ = f ₃ · CTF f ₃ : 5- 10 %	C ₁₀	Cargas de capital	C ₁₀ = f ₁₀ · CTF f ₁₀ : 15%
C ₄	Materiales Auxiliares	C ₄ = f ₄ · C ₃ f ₄ : 100 %	C ₁₁	Seguros	C ₁₁ = f ₁₁ · CTF f ₁₁ : 1%
C ₅	Empaquetado y envío	Despreciable	C ₁₂	Impuestos locales	C ₁₂ = f ₁₂ · CTF f ₁₂ : 2%
C ₆	Mano de obra directa (MOD)	Según estimaciones (Tabla 11)	C ₁₃	Royalties	C ₁₃ = f ₁₃ · CTF f ₁₃ : 1%
C ₇	Costes de laboratorio	C ₇ = f ₇ · C ₆ f ₇ : 20 %	C ₁₄	Coste de Producción Directo (CPD)	C ₁₄ = $\sum_{i=1}^{13} C_i$

Tabla AnxIII-3. Estimación de números de operarios en función del equipamiento

Equipo	Operario/unidad	Equipo	Operario/unidad	Equipo	Operario/unidad
Evaporador	0,3	Torres (incluidos auxiliares)	0,2 – 0,5	Filtros	1
Vaporizadores	0,3	Bombas	0,1 – 0,2	Filtros de vacío	0,2
Hornos	0,5	Reactores tipo batch	1	Filtros de marco y plato	1
Ventiladores	0,05	Reactores continuos	0,5	Filtros rotatorios	0,1
Compresores	0,15	Separador Centrifugo	0,25 – 0,5	Vasijas y tanques	0,2 – 0,5
Intercambiadores de calor	0,1	Cristalizador mecánico	0,16	Secador rotativo	0,5
Spray dryer	1	Soplantes	0,15		

REFERENCIAS

- [1] Joanna Harasym, Tomasz Podeszwa, «Towards sustainable de-growth – medical survey data as predictors for estimation of niche market value – gluten-free beer market case, *Journal of Cleaner Production*,» 2015, disponible en: [Towards sustainable de-growth – medical survey data as predictors for estimation of niche market value – gluten-free beer market case - ScienceDirect](#)
- [2] Comisión Europea, «Reglamento (CE) No 41/2009 sobre alimentos sin gluten, » 2009, disponible en: [Reglamento - 41/2009 - EN - EUR-Lex](#)
- [3] A. Madrid Vicente, «Elaboración de la cerveza,» 2021.
- [4] B. Albán Cabaco, J. M. Núñez Tabales, y S. Mª Sánchez Cañizares, «El sector cervecero artesanal español y sus posibilidades de internacionalización,» 2015, disponible en: [Microsoft Word - R15-2-11-Sandra-In-15-05-21-Es.doc](#)
- [5] I. Polanco Allué, «Enfermedad celíaca,» *Revista del Laboratorio Clínico*, 2014, disponible en: [Enfermedad celíaca](#)
- [6] I. de la Calle, G. Ros, R. Peñalver, y G. Nieto, «Enfermedad celíaca: causas, patología y valoración nutricional de la dieta sin gluten,» 2020, disponible en: <https://dx.doi.org/10.20960/nh.02913>
- [7] Guías Mundiales de la Organización Mundial de Gastroenterología «Enfermedad celíaca,» 2016, disponible en: [WGO Practice Guidelines](#)
- [8] D. Schuppan, S. Neufang, and B. Wanger, «Celiac disease: Novel pharmacological therapies (Zöliakie: Neue pharmakologische Therapien),» 2025, disponible en: [\[Celiac disease: Novel pharmacological therapies\] - PubMed](#)
- [9] D. Schuppan *et al.*, «Un ensayo aleatorizado de un inhibidor de la transglutaminasa 2 para la enfermedad celíaca,» *The New England Journal of Medicine*, 2021, disponible en: [A Randomized Trial of a Transglutaminase 2 Inhibitor for Celiac Disease | New England Journal of Medicine](#)
- [10] A. Fasano, A. Sapone, V. Zavallos, and D. Schuppan, «Sensibilidad al gluten no celíaca,» 2015, disponible en: [Nonceliac Gluten Sensitivity - ScienceDirect](#)
- [11] F. G. Meussdoerffer, «A comprehensive history of beer brewing,» 2009, disponible en: [c01.indd](#)
- [12] El Santuario de la Cerveza, «Historia de la cerveza,» 2021, disponible en: [Historia de la cerveza - El Santuario de la Cerveza](#)
- [13] W. Kunze, «Tecnología para Cerveceros y Malteros,» 1ª ed. en español, Berlín, Alemania: VLB Berlin, 2006.
- [14] X. García-Barber y J. Olalla-Marañón, «La cerveza en España,» 2014, disponible en: [ProQuest Ebook Central - Reader](#)

- [15] El Abuelo Cerveceros, «Historia de la cerveza,» 2025, disponible en: [HISTORIA archivos - EL ABUELO CERVECERO](#)
- [16] S. Radonjić, V. Maraš, J. Raičević, and T. Košmerl, «Wine or beer? Comparison, changes and improvement of polyphenolic compounds during technological phases,» *Molecules*, 2020, disponible en: [Wine or Beer? Comparison, Changes and Improvement of Polyphenolic Compounds during Technological Phases](#)
- [17] A. Martinez-Gomez, I. Caballero, and C. A. Blanco, «Phenols and melanoidins as natural antioxidants in beer: Structure, reactivity and antioxidant activity,» *Biomolecules*, 2020, disponible en: [biomolecules-10-00400.pdf](#)
- [18] «Características del cereal cebada y sus propiedades,» *Botanical-online*, 2025, disponible en: [Características del cereal cebada y sus propiedades – Botanical-online](#)
- [19] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «Información general del sector del lúpulo,» *Gobierno de España*, disponible en: [Información general del sector del Lúpulo](#)
- [20] Cervecistas, «La levadura: el cuarto ingrediente de la cerveza,» *Cultura Cervecista*, 2022, disponible en: [La levadura, el cuarto ingrediente de la cerveza - Cervecistas](#)
- [21] DSM, «Guide to Brewing Enzymes for Craft Brewers,» *Craft Brewing Guide*, 2018, disponible en: [DSM -Craft-Brewing-Guide-2018 DIGITAL.pdf](#)
- [22] M. Deželak, M. Zarnkow, T. Becker y I. J. Košir, «Processing of bottom-fermented gluten-free beer-like beverages based on buckwheat and quinoa malt with chemical and sensory characterization,» *J. Inst. Brew.*, 2014, disponible en: [Processing of bottom-fermented gluten-free beer-like beverages based on buckwheat and quinoa malt with chemical and sensory characterization - Deželak - 2014 - Journal of the Institute of Brewing - Wiley Online Library](#)
- [23] Observatorio Sectorial DBK de Informa, «Cervezas Artesanas,» Nota de prensa, 2023, disponible en: [Cervezas Artesanas | Nota de prensa 2023 | DBK Observatorio Sectorial](#)
- [24] AECAI, «Informe de cerveza artesanal en España,» *AECAI*, enero 2022. Disponible en: [informe-cerveza-artesanal-espana.pdf](#)
- [25] Diario de Gastronomía, «Perfil más frecuente del consumidor de cerveza artesanal,» *Diario de Gastronomía*, 2019, disponible en: [Perfil más frecuente del consumidor de cerveza artesanal - Diario de Gastronomía: Cocina, vino, gastronomía y recetas gourmet](#)
- [26] Mordor Intelligence, «Análisis de participación y tamaño del mercado de bebidas sin gluten tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029),» *Mordor Intelligence*, disponible en: [Tamaño del mercado de bebidas sin gluten y análisis de acciones - Informe de investigación de la industria - Tendencias de crecimiento](#)
- [27] Federación de Asociaciones de Celíacos de España (FACE) «Análisis estadístico de la realidad del colectivo celiaco 2023», 2023, disponible en: [Analisis-estadistico-de-la-realidad-del-colectivo-celiaco-2023.pdf](#)
- [28] Cerveceros de España, «Informe Socioeconómico del Sector de la Cerveza en España 2023», 2023, disponible en: [6669bc999bca5 Informe Socioeconomico 2023 final pgs simples.pdf](#)

- [29] Instituto Nacional de Estadística, «Padrón municipal: población por provincias y sexo», INE, 2024, disponible en: <https://www.ine.es>
- [30] B. Martínez Mingo, «El consumo de cerveza cae un 3,5%: 56 litros de media por persona en 2023,» *ABC*, 2024, disponible en: [El consumo de cerveza cae un 3,5%: 56 litros de media por persona en 2023](#)
- [31] J. M. Del Olmo, «¿Quién, por qué, cuándo y dónde se consume cerveza en España?,» *Consumidor Global*, 2025, disponible en: [¿Quién, por qué, cuándo y dónde se consume cerveza en España?](#)
- [32] Cerveceros de España y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «Informe Socioeconómico del Sector de la Cerveza en España 2023,» Cerveceros de España, 2024, disponible en: [cerveceros.org/uploads/6669bc999bca5_Informe Socioeconomico 2023 final pgs simples.pdf](https://cerveceros.org/uploads/6669bc999bca5_Informe_Socioeconomico_2023_final_pgs_simples.pdf)
- [33] P. Monforte, «Guía de la cerveza artesanal de Sevilla,» *CosasDeCome Sevilla*, 2019, disponible en: [Guía de la cerveza artesanal de Sevilla - CosasDeCome Sevilla](#)
- [34] M. Liu, M. Hu, H. Zhou, Z. Dong y X. Chen, «Producción de alto nivel de endopeptidasa prolii *Aspergillus niger* a partir de residuos agrícolas y su aplicación en la elaboración de cerveza,» *Microb. Cell Fact.*, 2023, disponible en: [Producción de alto nivel de endopeptidasa prolii Aspergillus niger a partir de residuos agrícolas y su aplicación en la elaboración de cerveza - PMC](#)
- [35] A. Bucio-Galindo, F. Izquierdo-Reyes y C. del C. Bautista-Muñoz, «Uso de la centrífuga de flujo continuo para clarificar vinos y cervezas artesanales,» *Agroproductividad*, 2020, disponible en: [\(PDF\) Uso de la centrifuga de flujo continuo para clarificar vinos y cervezas artesanales](#)
- [36] Asociación de Cerveceros Caseros Españoles (ACCE), «Carbonatación con azúcar,» *cerveceros-caseros.com*, 2011, disponible en: [Carbonatación con azúcar - Asociación de Cerveceros Caseros Españoles](#)
- [37] J. J. García Navas, «Metabolismo de la glucosa en la fermentación alcohólica,» *PintaBeer: ciencia y tecnología*, 2022, disponible en: [Metabolismo de la glucosa en la fermentación alcohólica](#)
- [38] A. Sánchez Torres, «Estudio cinético de la fermentación alcohólica con *Saccharomyces cerevisiae* a escala laboratorio,» Trabajo Fin de Grado, Univ. Politécnica de Valencia, 2016.
- [39] F. Bruni, «Quality control in brewery industry – Understanding yeast and sugar interplay in the mash phase,» *CDR BeerLab®*, 2025, disponible en: [Control de calidad en la industria cervecera: levadura y azúcar en la fase de maceración | Laboratorio® de cerveza CDR](#)
- [40] YoLong Brewtech, «Significance of wort boiling,» 2025 disponible en: [¿Cuál es el significado de la ebullición del mosto-YoLong Brewtech](#)
- [41] L. Alessandrini, R. Marconi, M. Zannotti, S. Ferraro, T. Dolezalova, D. Piatti, G. Namazzadeh, S. Angeloni y G. Sagratini, «Chemical Characterization of Hot Trub and Residual Yeast: Exploring Beer By-Products for Future Sustainable Agricultural Applications,» *Foods*, 2025, disponible en: [Caracterización química de la levadura caliente y la levadura residual: exploración de los subproductos de la cerveza para futuras aplicaciones agrícolas sostenibles](#)

