

Trabajo Fin de Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Ingeniería básica de una planta de producción de leche UHT sin lactosa por dosificación en línea

Autora: Matilde Xiaoyu Mesa Hernández

Tutor: Daniel Jesús Rosado Alcarria

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

Sevilla, 2026



Trabajo Fin de Grado
en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Ingeniería básica de una planta de producción de leche UHT sin lactosa por dosificación en línea

Autora:

Matilde Xiaoyu Mesa Hernández

Tutor:

Daniel Jesús Rosado Alcarria

Profesor Titular

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2026

Trabajo Fin de Grado: Ingeniería básica de una planta de producción de leche UHT sin lactosa por
dosificación en línea

Autor: Matilde Xiaoyu Mesa Hernández

Tutor: Daniel Jesús Rosado Alcarria

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2026

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas que han confiado en mí y me han brindado su apoyo incondicional. De manera especial, agradezco a mi familia, amigos y profesores por ser los pilares fundamentales durante este proceso.

Asimismo, deseo extender mi más sincero agradecimiento a las entidades y profesionales que han colaborado de forma desinteresada en el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, aportando información y experiencias clave para el proyecto:

A COVAP, muy especialmente a María Luisa Fernández, Alberto Ramos y Ester López, por la excelente acogida que me brindaron y por hacer posible la visita a sus instalaciones.

A la Asociación de Intolerantes a la Lactosa en España (ADILAC) y, muy significativamente, a su presidente, Oriol Sans, por ayudarme a entender la realidad de la intolerancia a la lactosa, aportando una visión clave sobre las normativas y los umbrales de tolerancia.

A la Federación Nacional de Industrias Lácteas (FENIL), concretamente a Mónica Ullate y a Alejandro Martínez, por su ayuda para profundizar en los datos de consumo y por orientarme sobre cómo localizar los recursos adecuados en el MAPA.

A la empresa Gémina, y en particular a Pedro S. Bernal, por facilitarme los datos para poder llevar a cabo el análisis económico.

Esta experiencia no solo ha supuesto un reto académico, sino que también me ha permitido forjar valores sólidos y crecer como persona.

Muchas gracias a todos por formar parte de este logro.

Matilde Xiaoyu Mesa Hernández

Sevilla, 2026

RESUMEN

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la realización de una ingeniería básica para una planta de producción de leche UHT sin lactosa con una capacidad nominal de procesamiento de 20.000 L/h, lo que supone una producción diaria de 400.000 litros. La producción se compone de tres variedades de leche adaptadas a las distintas exigencias nutricionales y preferencias del mercado: entera, semidesnatada y desnatada.

La planta está organizada en torno a un proceso continuo estructurado en varias etapas principales: la fase de recepción y acondicionamiento (que abarca la estandarización, desaireación y homogeneización), la etapa de tratamiento térmico UHT para esterilización, y la zona de almacenamiento, dosificación enzimática y envasado. Para optimizar la producción, la instalación cuenta con un sistema de separación centrífuga que permite ajustar dinámicamente el contenido de materia grasa para obtener las tres variedades bajo la misma línea. Además, implementa tecnología de dosificación aséptica en línea (post-hidrólisis), permitiendo que la degradación de la lactosa se realice directamente en el envase durante su periodo de cuarentena.

En el desarrollo del trabajo se explican los cálculos y criterios técnicos empleados para el diseño de los equipos necesarios en cada etapa del proceso productivo, apoyándose en la resolución de los balances de materia y energía en régimen estacionario y en datos bibliográficos. Además, se realiza un análisis económico completo para estimar tanto la inversión total de capital (CTI) como los costes totales de producción (CTP) asociados a la planta, culminando con la evaluación de su viabilidad financiera a través del Valor Actual Neto (VAN).

ABSTRACT

The objective of this project is the basic engineering design of a production facility for lactose-free UHT milk, with a nominal capacity of 20,000 L/h, resulting in a daily production of 400,000 Liters. The production encompasses three varieties of milk adapted to different nutritional requirements and market preferences: whole, semi-skimmed, and skimmed milk.

The plant is organized around a continuous process structured into several main stages: raw milk reception and conditioning (including standardization, deaeration, and homogenization), UHT thermal treatment for sterilization, and aseptic storage, in-line enzymatic dosing, and aseptic packaging. To enhance efficiency, the facility features a centrifugal separation system that dynamically adjusts the fat content to produce all three varieties within the same line. Furthermore, it implements in-line aseptic dosing technology (post-hydrolysis), enabling lactose degradation to take place directly inside the packaging during the quarantine period.

This project provides detailed calculations and technical criteria applied in designing the necessary equipment for each stage of the production process, drawing on the resolution of steady-state mass and energy balances and relevant bibliographic sources. Furthermore, a comprehensive economic analysis is conducted to estimate both the Total Capital Investment (CTI) and the Total Production Costs (CTP) associated with the plant, ultimately evaluating its financial viability through the Net Present Value (NPV).

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	9
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	13
ÍNDICE	14
ÍNDICE DE TABLAS	18
ÍNDICE DE FIGURAS.....	20
MEMORIA DESCRIPTIVA.....	22
CAPITULO I INTRODUCCIÓN	23
1 INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	1
2 ANTECEDENTES	3
2.1 Introducción.....	3
2.2 Composición de la leche de vaca.....	3
2.2.1 Agua.....	3
2.2.2 Sólidos	3
2.2.3 Lípidos (materia grasa)	4
2.2.4 Proteínas.....	4
2.2.5 Glúcidos: la lactosa	4
2.3 La enzima lactasa	5
2.3.1 La enzima lactasa	5
2.3.2 Lactasa de uso industrial	6
2.4 Intolerancia a la lactosa	6
2.4.1 Causas y consecuencias	6
2.4.2 Tratamiento.....	7
2.4.3 Origen y estado natural del ser humano.....	7
2.4.4 Impactos nutricionales de productos bajos en lactosa	7
2.4.5 Clasificaciones de leches.....	7
2.5 Marco normativo legal de la actividad	8
2.5.1 Normativa general	8
2.5.2 Normativa específica del producto	8
2.5.3 Normativa de productos con alérgenos	8
2.5.4 Marco regulatorio y umbrales internacionales.....	9
2.5.5 Normativa ambiental	9
3 PRODUCCIÓN Y ESTUDIO DE MERCADO	11
3.1 Mercado lácteo	11
3.2 Mercado de productos sin lactosa	12
4 TECNOLOGÍAS DEL DESLACTOSADO	15
4.1 Separación enzimática	15
4.2 Hidrólisis enzimática	16
4.2.1 Dosificación en lote o batch (pre-hidrólisis)	16
4.2.2 Dosificación en línea (post-hidrólisis).....	17
CAPITULO II PROCESOS.....	19
5 PROCESO DE ELABORACIÓN	21
5.1 Recepción y precalentamiento	21
5.2 Desaireación	22
5.3 Estandarización y clarificación	22
5.4 Homogenización	22
5.5 Tratamiento térmico UHT y enfriamiento	23
5.6 Almacenamiento aséptico	23
5.7 Dosificación enzimática en línea.....	24

5.8	Envasado aséptico	24
5.9	Cuarentena e hidrólisis en el envase	24
6	EQUIPOS PRINCIPALES	25
6.1	Camiones cisterna.....	25
6.2	Tanques silos.....	25
6.3	Intercambiador de placas.....	26
6.4	Separador centrífugo en caliente	26
6.5	Desaireador	27
6.6	Homogeneizador	28
6.7	Intercambiador tubular	29
6.8	Tubo de retención.....	30
6.9	Tubo de mantenimiento	30
6.10	Unidad de dosificación aséptica	31
6.11	Tanque aséptico.....	31
6.12	Envasadora aséptica.....	32
7	DESCRIPCIÓN FLUJO DEL PROCESO.....	35
8	GESTIÓN AMBIENTAL	37
8.1	Emisiones a la atmósfera y selección de combustibles.....	37
8.2	Generación y gestión de residuos sólidos	37
8.3	Gestión de efluentes líquidos y depuración (EDARI).....	39
	MEMORIA JUSTIFICATIVA.....	41
9	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	43
10	BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA.....	45
10.1	Balance de Materia	45
10.2	Balance de Energía.....	49
10.2.1	Homogeneizador.....	51
10.2.2	Intercambiadores de calor	52
10.2.3	Inyección Aséptica de Lactasa.....	54
11	DIMENSIONADO DE EQUIPOS	57
11.1	Silos de almacenamiento con agitador	57
11.2	Separador centrífugo (desnatadora)	58
11.3	Desaireador	59
11.4	Homogeneizador	60
11.5	Tubos de mantenimiento o de retención.....	60
11.6	Equipos de intercambiador de calor.....	60
11.6.1	Intercambiador De Placas	60
11.6.2	Intercambiador Tubular.....	61
11.7	Envasado	63
11.8	Bombas	63
12	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO.....	65
12.1	Costes Equipos Principales de la Planta	65
12.1.1	Costes de Energía Total aportada a la Planta	66
12.1.2	Costes de Materias Primas	67
12.2	Coste Total de Inversión de la Planta	68
12.3	Coste Total de la Producción de la Planta.....	69
12.3.1	Estimación de la Mano de Obra (MOD)	69
12.3.2	Costes de Envasado e Impacto Fiscal (El caso Tetra Brik).....	70
12.4	Análisis de Rentabilidad	71
12.4.1	Estimación de Flujos de Caja.....	71
12.4.2	Valor Actual Neto (VAN).....	72
12.4.3	Tasa Interna de Rentabilidad (TIR).....	73
12.4.4	Payback (PB)	73
13	DISCUSIONES	75
14	CONCLUSIONES.....	77

ANEXO A. DIAGRAMA DE PROCESO (PFD) 79

ANEXO B. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA 80

ANEXO C. TABLAS DE DIMENSIONES DE EQUIPOS 83

ANEXO D. HOJAS DE ESPECIFICACIONES.....87

ANEXO E. ANÁLISIS ECONÓMICO 101

REFERENCIAS 103

GLOSARIO.....111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición cuantitativa de la leche de vaca [6]	4
Tabla 2. Grasa, proteína y lactosa contenida en leche de diferentes especies mamíferas [7]	5
Tabla 3. Ventajas y desventajas de separación por membranas	16
Tabla 4. Ventajas y desventajas de dosificación en lote o batch	17
Tabla 5. Ventajas y desventajas de la dosificación en línea	17
Tabla 6. Ejemplos de temperaturas y presiones de homogeneización. [6]	28
Tabla 7. Resumen de la composición de laminado [67]	33
Tabla 8. Resumen de los principales equipos del proceso productivo.	34
Tabla 9. Propiedades medias de algunos combustibles.	37
Tabla 10. Principales residuos encontrados en una empresa láctea [68]	38
Tabla 11. Cuotas de producción y balance de caudales para las distintas líneas de envasado.	43
Tabla 12. Composición porcentual en peso (% p/p) de los datos de partida y estandarización	46
Tabla 13. Perfil de temperaturas de las corrientes en los intercambiadores tubulares de regeneración (E-102 y E-103)	53
Tabla 14. Perfil de temperaturas en las secciones de calentamiento y enfriamiento final con fluidos de servicio	54
Tabla 15. Parámetros de operación y características de diseño del equipo [82]	59
Tabla 16. Unidades de equipo de proceso y sus costes unitarios en €	66
Tabla 17. Energía total aportada en la planta.	66
Tabla 18. Estimación de la demanda total de consumos	67
Tabla 19. Demanda de materia prima según línea	68
Tabla 20. Demanda total de materias primas	68
Tabla 21. Cálculo del Coste Total de Inversión	69
Tabla 22. Cálculo del Coste Total de Producción	71
Tabla 23. Distribución del volumen de producción e ingresos brutos anuales según la cuota de mercado en España.	72
Tabla 24. Propiedades termo físicas en función de la temperatura para componentes [78]	83
Tabla 25. Dimensionado y selección de agitadores.	84
Tabla 26. Dimensionado y selección para separador centrífugo. [82]	85
Tabla 27. Factores de Lang modificados por Peter y Timmerhaus en plantas de proceso: sólido, semifluido y fluido	101
Tabla 28. Factores de Chilton para el coste total de operación de la planta	101
Tabla 29. Estimación de números de operarios en función del equipamiento.	101
Tabla 30. Estimación de los Flujos Netos de Caja (FNC) del proyecto para el análisis de viabilidad financiera.	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Grado relativo de dulzor en diferentes tipos de azúcares [6]	5
Figura 2. Descomposición de la lactosa por acción enzimática [9]	6
Figura 3. Comparación del mecanismo fisiológico entre la digestión normal y la intolerancia a la lactosa [15]	7
Figura 4. Mapa o línea temporal de límites a nivel mundial [33]	9
Figura 5. Producción mundial de leche bovina en 2000-2023 y evolución entre años 2000-2023 [39]	12
Figura 6. Estimación de la tasa de crecimiento anual compuesto (TCAC) del segmento de mercado de lácteos sin lactosa durante el periodo 2017-2022. Se indica la facturación anual total en M€. SL: sin lactosa [42]	13
Figura 7. Marcas representativas de productos lácteos sin lactosa de algunos países. [46]	14
Figura 8. Sello oficial de la asociación española ADILAC (izquierda) y distintivo de la marca global LIGN (derecha). [47]	14
Figura 9. Combinación de ultrafiltración (UF) y nanofiltración (NF) para obtener leche baja en lactosa [49]	15
Figura 10. Diagrama de procesos para métodos de hidrólisis.	16
Figura 11. Diagrama de bloques del proceso productivo	21
Figura 12. Flujo óptimo del proceso en el sistema indirecto UHT [60]	23
Figura 13. Camión cisterna isotérmico compartimentado de acero inoxidable para el transporte de leche cruda [61]	25
Figura 14. Componentes de intercambiador de placas [62]	26
Figura 15. Separador centrífugo modelo A Series [63]	27
Figura 16. Diagrama de un separador de vapor-líquido [64]	28
Figura 17. Sección transversal de un homogeneizador (izquierda) y detalle del flujo en la válvula de homogeneización (derecha).	29
Figura 18. Planta piloto UHT basada en intercambiadores de calor tubulares	29
Figura 19. Sección transversal del intercambiador tubular con regeneración P2P	30
Figura 20. Sección de tubos de retención empleados para la etapa de estabilización térmica del proceso.[66]	30
Figura 21. Unidad de dosificación	31
Figura 22. Tanque de almacenamiento aséptico GEA con colector de válvulas integrado	32
Figura 23. Envasadora aséptica [54]	32
Figura 24. Diagrama de flujo del envasado aséptico [60]	33
Figura 25. Balance de materia para la producción de leche sin lactosa en la Línea 1	48
Figura 26. Balance de materia para la producción de leche sin lactosa en la Línea 2	48
Figura 27. Balance de materia para la producción de leche sin lactosa en la Línea 3	49
Figura 28. Dimensionado y selección de agitadores.	85

MEMORIA DESCRIPTIVA

CAPITULO I INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y ALCANCE

Hoy en día, preservar el valor nutricional de un alimento tan esencial como la leche, lleva consigo la necesidad de evolucionar e innovar en la industria para poder hacer frente a las expectativas de los consumidores y a las exigencias de la salud pública. La industria láctea continúa siendo un pilar fundamental en la alimentación mundial desde hace siglos; se trata de un sector en constante crecimiento y desarrollo tecnológico, manteniendo su seguridad alimentaria, su calidad y el innegable legado nutricional que le caracteriza.

A raíz de este hecho surgen las modernas centrales lecheras que, lideradas por las nuevas demandas del mercado, disponen de sistemas continuos de procesamiento térmico y envasado aséptico automatizado que garantizan una distribución eficiente a nivel nacional e internacional. Además, para satisfacer las necesidades de los consumidores, se han incorporado soluciones biotecnológicas con ingredientes específicos (como la enzima lactasa) dirigidas a aquellos con requerimientos dietéticos especiales, concretamente la intolerancia a la lactosa.

La importancia del estudio de la producción de leche sin lactosa radica en el incremento exponencial de su demanda en los últimos años. Estas especialidades lácteas de alta digestibilidad continúan posicionándose ya no solo como un producto de nicho, sino como una opción predominante y de alto valor añadido en los hogares.

Por ello, el objetivo del presente proyecto es abordar la Ingeniería Básica de una Planta de Producción de leche UHT sin lactosa, empleando tecnología de dosificación aséptica en línea, que cumpla con la estricta normativa vigente en materia alimentaria y medioambiental para poder ser comercializada. La finalidad es diseñar una instalación operando en régimen continuo para obtener una capacidad nominal de 20.000 L/h, lo que supone una producción diaria de 400.000 L/día de leche procesada.

En cuanto al alcance, en términos generales, se llevará a cabo un análisis minucioso del proceso de obtención de dicho producto, desde la recepción y almacenamiento de la leche cruda, pasando por su tratamiento térmico y homogeneización, hasta el envasado aséptico y análisis de viabilidad económica. El contenido se presenta en capítulos que, en su conjunto, conforman la memoria descriptiva, justificativa y las conclusiones del proyecto.

Por un lado, en la memoria descriptiva se expone una breve contextualización del producto (diferenciando clínicamente la intolerancia de la alergia alimentaria), el marco normativo específico de la actividad y, además, se ha realizado un estudio de mercado sobre la demanda actual para adecuar el diseño de la planta. Seguidamente, se detalla el proceso productivo y la tecnología que resulta más adecuada para obtener un producto seguro y de calidad (como la regeneración térmica), de forma que la estructura final del proceso queda representada en los diagramas de bloques y en el diagrama de flujo de procesos (PFD).

Por otro lado, la memoria justificativa comprende la resolución de los balances de materia y energía en estado estacionario y también, el diseño, cálculo y dimensionamiento de los equipos principales. Finalmente, para estimar la viabilidad del proyecto se realiza un análisis económico, determinando previamente los costes totales de inversión y de operación característicos de la planta.

2 ANTECEDENTES

El presente apartado establece los fundamentos teóricos, clínicos y regulatorios que enmarcan el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se analiza la composición fisicoquímica de la leche de vaca y el papel fundamental de la enzima lactasa. A continuación, se aborda en profundidad la intolerancia a la lactosa, detallando sus mecanismos fisiológicos, diagnóstico y diferencias con la alergia a la proteína láctea. Finalmente, se expone el marco normativo que rige la actividad, abarcando las exigencias generales de higiene y medioambiente y etiquetado para la comercialización de productos "sin lactosa".

2.1 Introducción

La leche presenta numerosas ventajas nutricionales, la más importante de las cuales es que constituye una fuente casi irremplazable de calcio dietético, lo que justifica el esfuerzo por incluirla en nuestra alimentación diaria [1].

Según BOE del 24/09/1994, se entiende por leche natural y cruda la leche producida por la secreción de la glándula mamaria de vacas, ovejas o cabras que no haya sido calentada a una temperatura superior a 40° C ni sometida a un tratamiento de efecto equivalente [2].

Desde la perspectiva médico-científica, los beneficios de la leche son incuestionables. Investigadoras como Ortega Anta et al. (UCM) la consideran el alimento ideal para el desarrollo mamífero [3]. Además, revisiones avaladas por la Fundación Iberoamericana de Nutrición y el CSIC (Hernández-Ruiz et al.) evidencian su efecto protector frente al síndrome metabólico, la diabetes tipo 2 y enfermedades cardiovasculares [4]. Finalmente, InLac subraya que el sector lácteo también es vital para la economía, el desarrollo rural y el medioambiente [5].

2.2 Composición de la leche de vaca

Las cantidades de los diversos componentes principales de la leche pueden variar considerablemente entre vacas de diferentes razas y entre vacas individuales de la misma raza. Por lo tanto, solo se pueden establecer valores límite para las variaciones.

2.2.1 Agua

La leche está compuesta, en promedio, por un 87-88% de agua. El contenido exacto depende de una combinación de factores estacionales, genéticos y dietéticos. El procesamiento de la leche para obtener diversos productos y derivados implica numerosas operaciones que modifican el contenido de agua e influyen en la interacción del agua con los sólidos lácteos constituyentes.

En productos de todos los contenidos de humedad, desde leches líquidas hasta leches en polvo, el agua sigue siendo un componente clave, cuyas propiedades inusuales (en comparación con moléculas similares) tienen efectos importantes en las características microbianas y físicas generales de dichos productos.

2.2.2 Sólidos

Además de los sólidos totales, el término sólidos no grasos (SNG) se utiliza para analizar la composición de la leche. SNG es el contenido de sólidos totales menos el contenido de grasa. El contenido medio de SNG, según la Tabla 1, es de 9,1 %. El pH de la leche normal generalmente se encuentra entre 6,5 y 6,7, siendo 6,6 el valor más común. Este valor se aplica a una temperatura de medición cercana a los 25 °C [6].

Tabla 1. Composición cuantitativa de la leche de vaca [6]

Composición	Límites de variación	Media
	%	%
Agua	85,5-89,5	87,5
Sólidos totales	10,5-14,5	13,0
Grasa	2,5-6,0	3,9
Proteína	2,9-5,0	3,4
Lactosa	3,6-5,5	4,8
Minerales	0,6-0,9	0,8

2.2.3 Lípidos (materia grasa)

La materia grasa de la leche se encuentra en forma de glóbulos grasos, conformados por pequeñas gotas de grasa. Los glóbulos de grasa son las partículas más grandes presentes en la leche. Sus diámetros oscilan entre 0,1 y 20 micras y varía dependiendo de las especies, siendo los de vaca los de mayor tamaño (4,55 micras) en comparación con otras especies mamarias, como los de la oveja y cabra. El tamaño de los glóbulos tiene un papel importante en el rendimiento de los procesos lácteos. Cuanto mayor sean, más fáciles serán de separar de la leche desnatada.

2.2.4 Proteínas

Las proteínas descompuestas en productos más simples por el sistema digestivo y por el hígado. La mayoría de las reacciones químicas que tienen lugar en el organismo son controladas por unas proteínas conocidas como enzimas. Las proteínas son moléculas gigantes formadas por unidades más pequeñas llamadas aminoácidos. Una proteína puede contener alrededor de 100 a 200 unidades de aminoácidos.

2.2.5 Glúcidos: la lactosa

El hidrato de carbono mayoritario de la leche es la lactosa, la cual se encuentra en forma de solución verdadera (Tabla 2). Además de lactosa, también se encuentran pequeñas cantidades de glucosa, galactosa y sacarosa. Normalmente, los porcentajes bajos de lactosa corresponden a la última leche de la lactación o a leches procedentes de vacas con mastitis u otras patologías en las ubres.

La lactosa es un disacárido originario de la leche de mamíferos y está compuesta por los monosacáridos alfa-D-glucosa y beta-D-galactosa. La mezcla de las dos formas de la lactosa equilibrada en disolución tiene una solubilidad de aproximadamente el 17% en agua a 15° C. Es conocida como el azúcar de la leche por ser el principal hidrato de carbono en la leche de mamíferos, por lo que resulta esencial en la nutrición de los niños. La Figura 1 ilustra que la lactosa posee la intensidad de dulzor más baja de los carbohidratos analizados. Tomando la sacarosa como referencia (100), la lactosa presenta un valor cercano a 40, lo que la sitúa sustancialmente por debajo del dulzor del azúcar de caña.

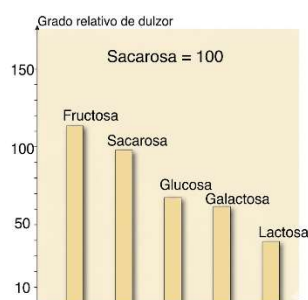


Figura 1. Grado relativo de dulzor en diferentes tipos de azúcares [6]

Tabla 2. Grasa, proteína y lactosa contenida en leche de diferentes especies mamíferas [7]

Especie	Grasa	Proteína	Lactosa
	(g/L)		
Humano	42	11	70
Vaca	35-45	30-36	47-50
Oveja	60-80	50-65	44-48
Cabra	30-34	27-37	41-48
Búfalo	70-74	38-44	48-55

2.3 La enzima lactasa

Las enzimas tienen la capacidad de provocar reacciones químicas y de afectar el curso y la velocidad de tales reacciones. Las enzimas llevan a cabo su tarea sin ser consumidas, por eso, se conocen como biocatalizadores, ya que son producidas por organismos vivos. Dos factores importantes en la acción enzimática son la temperatura y el pH. Como norma, son más activas a temperaturas óptimas entre 25 y 50° C

2.3.1 La enzima lactasa

La lactasa se halla en la superficie de las células epiteliales intestinales, especialmente en el intestino delgado proximal. Esta enzima es responsable de la rotura de la lactosa en glucosa y galactosa. Como se ilustra en la Figura 2, la lactosa se representa como un disacárido compuesto por dos anillos unidos. La enzima lactasa (que en contextos biotecnológicos es a menudo una enzima bacteriana producida por bacterias del ácido láctico) cataliza la ruptura de este enlace glucosídico mediante hidrólisis, es decir, mediante la adición de una molécula de agua [8].

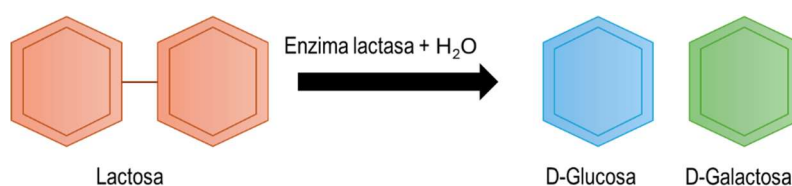


Figura 2. Descomposición de la lactosa por acción enzimática [9]

De forma natural, la lactasa también está presente en la leche cruda, aunque únicamente en cantidades traza [10]. Cuando el organismo humano no produce suficiente lactasa, la lactosa no digerida alcanza el colon. Allí, la microbiota intestinal la fermenta, lo que genera gases y provoca síntomas gastrointestinales como hinchazón, diarrea y dolor abdominal [11].

2.3.2 Lactasa de uso industrial

Tradicionalmente, la lactasa se ha comercializado como suplemento en tabletas de diversas dosis, disponibles sin receta médica en la mayoría de los países. A nivel industrial, la enzima se emplea en la elaboración de productos deslactosados y se obtiene habitualmente de microorganismos, como las levaduras del género *Kluyveromyces* [12]. Su uso directo en los alimentos presenta ciertos retos técnicos: requiere un mayor tiempo de actuación, necesita un mezclado homogéneo y se inactiva en medios ligeramente ácidos. Debido a estas limitaciones tecnológicas, en el pasado su formato líquido o en polvo para adición directa fue mucho menos popular entre los consumidores que las prácticas tabletas [13].

2.4 Intolerancia a la lactosa

Existe una aparición cada vez mayor de reacciones adversas a alimentos (RAA) que engloba tanto a las alergias alimentarias como a las intolerancias alimentarias, entre otras. Las RAA se definen como cualquier respuesta clínicamente anormal que pueda atribuirse a la ingestión, contacto o inhalación de un alimento, de sus derivados o de algún aditivo que contengan.

La intolerancia a la lactosa es la más frecuente en adultos si hablamos exclusivamente de la intolerancia alimentaria. La prevalencia no es homogénea ni al azar, varía dependiendo principalmente del origen étnico. De este modo, en poblaciones de raza africana y asiática la intolerancia a la lactosa oscila entre el 90-95%; en la de origen hispanoamericano, entre un 50-70% [14].

2.4.1 Causas y consecuencias

En la intolerancia a la lactosa existe un aumento de lactosa a nivel intestinal, lo que ocasiona mayor secreción de líquido hacia la luz intestinal como consecuencia del efecto osmótico del disacárido, lo que puede causar diarrea. Posteriormente, al llegar al colon, la lactosa digerida por las bacterias saprofitas origina diversos ácidos orgánicos y gases que condicionan la aparición de flatulencia, dolor abdominal y molestias en la defecación. En la Figura 3 se representa el mecanismo fisiológico que ocurre en el sistema digestivo, a la izquierda, la enzima hidroliza el disacárido en glucosa y galactosa en el intestino delgado para su correcta absorción. A la derecha, ante una deficiencia de lactasa, la lactosa pasa intacta al intestino grueso provocando malabsorción. Esto genera un gradiente osmótico (entrada de agua) y una posterior fermentación bacteriana, produciendo los gases y ácidos [14].

La intolerancia a la lactosa se debe a un déficit de sustancias enzimáticas necesaria para el proceso de digestión, absorción o utilización de un alimento. Es por ello, que esta patología también es conocida como déficit de lactasa. Cuando la lactasa de la mucosa intestinal es deficiente no puede llevarse a cabo la digestión normal de la lactosa, la cual se acumula en cantidades excesivas en la luz del intestino, la mayor parte de la lactosa pasa al colon en donde una mínima parte es hidrolizada a monosacáridos por la lactasa bacteriana, pero la cantidad restante sufre fermentación con la producción de ácidos orgánicos y formación de gases [8].

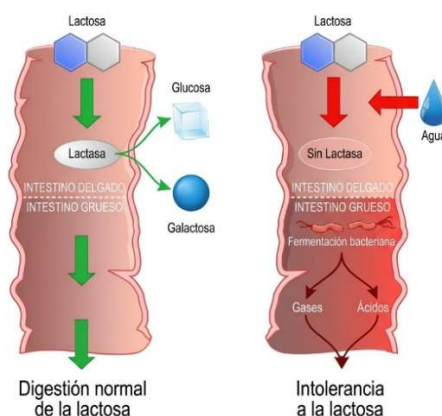


Figura 3. Comparación del mecanismo fisiológico entre la digestión normal y la intolerancia a la lactosa [15]

2.4.2 Tratamiento

El principal tratamiento será evitar la ingesta del alimento que la contiene, aunque esta recomendación variará dependiendo de cada individuo, pueden existir pacientes que requieran de ingestas de 30 g de lactosa (400 ml de leche entera) para generar síntomas y otros bastará la ingesta de 5 g (70 ml de leche entera) [14].

2.4.3 Origen y estado natural del ser humano

Biológicamente, la mayoría de los seres humanos dejan de producir lactasa de forma natural tras el periodo de destete [16]. Como resultado, se estima que alrededor del 75 % de la población mundial pierde la capacidad de procesar la lactosa en la edad adulta. Este era el estado natural predominante en las poblaciones humanas de cazadores-recolectores antes de la Revolución Neolítica [17].

2.4.4 Impactos nutricionales de productos bajos en lactosa

Según los hallazgos revisados por la EFSA y otros estudios nutricionales, la hidrólisis enzimática de la lactosa en glucosa y galactosa no conlleva consecuencias nutricionales negativas, siempre que los demás parámetros de la leche permanezcan inalterados. Aunque la evidencia sobre si la lactosa favorece la absorción de calcio no está científicamente concluyente, las fórmulas 'sin lactosa' con contenidos de calcio similares a la leche convencional han demostrado ser adecuadas para satisfacer las necesidades nutricionales de calcio. Es decir, no se considera que la falta de lactosa en la leche cause una deficiencia clínica de calcio, siempre que se consuma la cantidad adecuada de este mineral [18].

2.4.5 Clasificaciones de leches

Atendiendo a su porcentaje de grasa y a las distintas preferencias nutricionales de los consumidores, el proceso de estandarización permite clasificar la leche en tres grandes grupos.

La leche entera se obtiene al estandarizar la leche para fijar su contenido de materia grasa en aproximadamente un 3,5 %. Gracias a este nivel de lípidos, el producto terminado mantiene intactas sus cualidades organolépticas, caracterizándose por poseer una textura más cremosa y un sabor intenso y rico. Constituye una fuente importante de energía (66 kcal/100 ml) y preserva las vitaminas liposolubles inherentes a la grasa láctea. Es la opción idónea para los consumidores que buscan el perfil sensorial y nutritivo tradicional de la leche pura [12].

La leche semidesnatada se produce ajustando el porcentaje de materia grasa a un valor intermedio, situado habitualmente en el rango del 1 % al 2 %, siendo muy común establecer un estándar de 1,5 %. Esta variedad proporciona un equilibrio logrando una compatibilidad entre el sabor y la textura que aporta la grasa láctea y la reducción calórica característica (46 kcal/100 ml). Es una alternativa de alto consumo para aquellos perfiles que buscan cuidar su alimentación de forma saludable sin sacrificar del todo las propiedades sensoriales [19].

La leche desnatada (o descremada) ajusta el contenido lipídico a niveles muy bajos, fijando un máximo del 0,5 %, aunque el contenido suele rondar el 0,1 %. El resultado es un producto con un aporte calórico

significativamente reducido (35 kcal/100 ml), ideal para dietas estrictas, pero que sigue conservando íntegros los nutrientes esenciales de la fase acuosa de la leche (proteínas de alto valor biológico, minerales como el calcio y vitaminas). Debido a la ausencia casi total de glóbulos grasos, esta variedad presenta una menor viscosidad, un color ligeramente más traslúcido y un sabor más suave [20].

2.5 Marco normativo legal de la actividad

El marco normativo por el que se rige la actividad de producción de leche de vaca sin lactosa a escala industrial se detalla a continuación.

2.5.1 Normativa general

- Reglamento (CE) nº 178/2002, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de enero de 2002, por el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan procedimientos relativos a la seguridad alimentaria. [21]
- Reglamento (CE) nº 852/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, relativo a la higiene de los productos alimenticios. [22]
- Reglamento (CE) nº 853/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, por el que se establecen normas específicas de higiene de los alimentos de origen animal.[23]
- Reglamento (CE) nº 854/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, por el que se establecen normas específicas para la organización de controles oficiales de los productos de origen animal destinados al consumo humano. [24]
- Reglamento (UE) 2017/625, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 15 de marzo de 2017, sobre los controles y otras actividades oficiales realizados para garantizar la aplicación de la legislación sobre alimentos y piensos, y de las normas sobre salud y bienestar de los animales, sanidad vegetal y productos fitosanitarios. [25]

2.5.2 Normativa específica del producto

- Real Decreto 989/2022, de 29 de noviembre, por el que se establecen normas básicas para el registro de los agentes del sector lácteo, movimientos de la leche y el control en el ámbito de la producción primaria y hasta la primera descarga. [26]
- Real Decreto 1054/2003, de 1 de agosto, por el que se aprueba la Norma de calidad para determinados tipos de leche conservada parcial o totalmente deshidratada destinados a la alimentación humana. [27]
- Real Decreto 1021/2022, de 13 de diciembre, por el que se regulan determinados requisitos en materia de higiene de la producción y comercialización de los productos alimenticios en establecimientos de comercio al por menor. [28]

2.5.3 Normativa de productos con alérgenos

- Reglamento (UE) nº 1169/2011, por el que se establece la normativa sobre la información alimentaria facilitada al consumidor, entre estos, la leche y sus derivados -incluida la lactosa- deben declararse en la etiqueta o en la lista de ingredientes. [29]
 - Sus artículos 9.1.c) y 21 obligan a informar sobre el empleo de sustancias que provocan intolerancias (como la lactosa).
 - Sus artículos 3 y 7 exigen prácticas informativas leales para no inducir a error al comprador ni incurrir en competencia desleal.
- Real Decreto 126/2015, por el que se regula la información alimentaria de los alimentos que se presentan sin envasar para la venta al consumidor final y a las colectividades, de los envasados en los lugares de venta

a petición del comprador y de los envasados por los titulares del comercio al por menor, así como la venta a distancia.[30]

- Dictamen del 10 de septiembre de 2010: Fecha del informe de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) sobre los contenidos máximos de lactosa para la intolerancia a la lactosa y la galactosemia, en el cual se apoya la AESAN para fijar sus orientaciones. [31]
- Reglamento de Ejecución (UE) N° 828/2014: Aunque regula específicamente la mención "sin gluten", la AESAN y la industria lo utilizan como análogo jurídico para aplicar el mismo criterio de lealtad comercial a la hora de indicar la ausencia de lactosa. [32]

2.5.4 Marco regulatorio y umbrales internacionales

Aunque no existen estándares comunes sobre el umbral de lactosa permitido, en la mayoría de los países, el contenido de lactosa de los productos bajos en lactosa y sin lactosa se encuentra entre 1 g/100 g y 10 mg/100 g, respectivamente.

Para definir con exactitud las especificaciones técnicas que debe cumplir la leche procesada en la planta, se puso en contacto directo con la presidencia de ADILAC (Asociación de Intolerantes a la Lactosa España). Gracias a esta consulta, Oriol Sans nos facilitó documentación interna y actualizada sobre el panorama regulatorio global, destacando la inexistencia de una normativa única a nivel mundial (ni siquiera a nivel de la Unión Europea). El límite permitido de lactosa residual varía significativamente dependiendo de la zona geográfica y las autoridades sanitarias locales. El análisis de esta Figura 4 revela las siguientes franjas de exigencia:

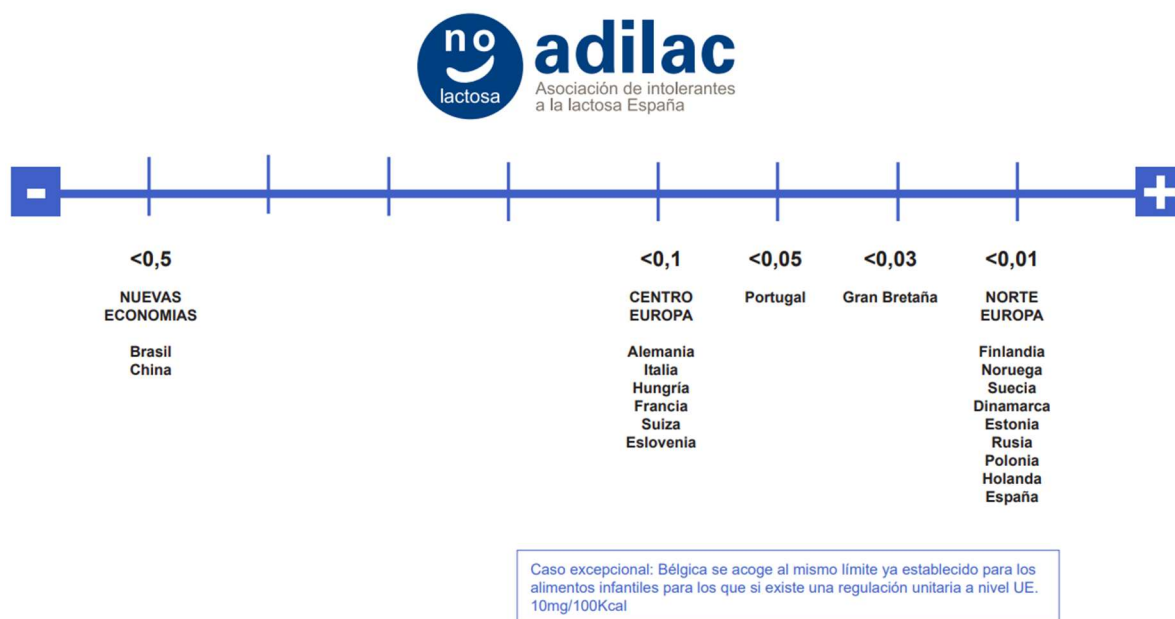


Figura 4. Mapa o línea temporal de límites a nivel mundial [33]

El criterio oficial de la AESAN, por el que se establece el límite analítico inferior al 0,01% de lactosa residual para autorizar la mención "Sin lactosa" en el etiquetado del producto final en España. [34]

2.5.5 Normativa ambiental

- Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación. [35]
- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. [36]
- Real Decreto 1042/2017, de 22 de diciembre, sobre la limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión medianas y por el que

se actualiza el anexo IV de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. [37]

- Ley 7/2022, por la que se establece el marco normativo de los residuos y suelos contaminados para una economía circular. [38]

3 PRODUCCIÓN Y ESTUDIO DE MERCADO

Este apartado analiza el contexto socioeconómico y las tendencias comerciales del sector lácteo, evaluando la viabilidad y la fuerte expansión de la categoría de productos «sin lactosa». En primer lugar, se expone la situación de la producción global y el claro dominio de la leche UHT en el mercado. A continuación, se examina el acelerado crecimiento del segmento sin lactosa frente a los lácteos tradicionales, destacando su proyección económica, los principales actores de la industria a nivel mundial y el papel fundamental de las certificaciones internacionales de etiquetado para garantizar la confianza del consumidor.

3.1 Mercado lácteo

La industria láctea representa uno de los sectores agroalimentarios más grandes e influyentes a nivel global. Según datos recientes de la FAO, la producción mundial de leche alcanzó los 933 millones de toneladas en 2023, de las cuales el 96 % corresponde a leche de vaca. Esto representa un incremento del 68 % en comparación con la producción del año 2000.

En la actualidad, el mercado está fuertemente liderado por Asia, que concentra cerca del 46 % de la producción total

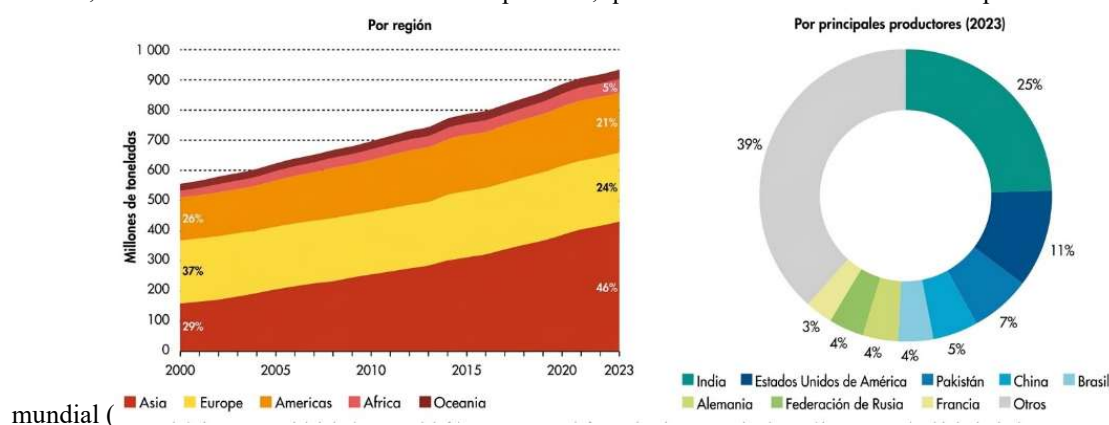


Figura 5, izquierda), seguido por Europa con un 24 %. El crecimiento de la producción asiática (con un incremento del 150 %) ha sido impulsado mayoritariamente por India, país que se consolida como líder absoluto al acaparar una cuarta parte (25 %) de la producción lechera mundial

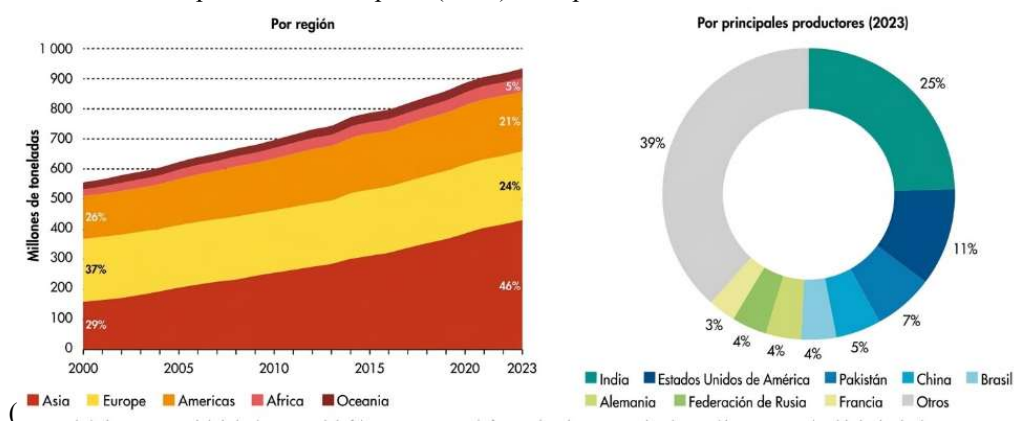


Figura 5, derecha).

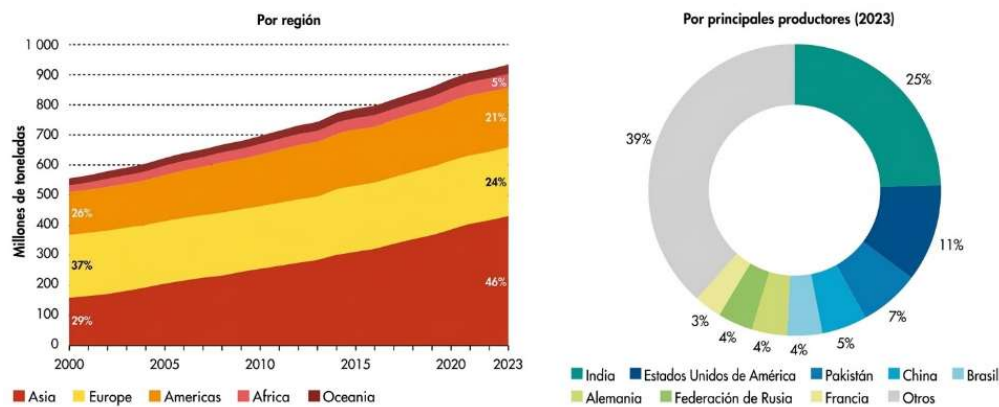


Figura 5. Producción mundial de leche bovina en 2000-2023 y evolución entre años 2000-2023 [39]

Para estimar la demanda, es importante considerar que el consumo medio total de leche líquida en España se sitúa en 67,98 litros por persona y año, según datos consolidados de 2023. Si nos enfocamos únicamente en el ámbito doméstico, la media nacional ronda los 63 litros anuales por individuo, una cifra que refleja una clara tendencia descendente durante la última década. En contraste, Andalucía presenta un escenario de demanda notablemente inferior, ya que es la comunidad autónoma con el menor consumo de leche líquida en los hogares de todo el país, registrando tan solo 52,99 litros por persona al año [41].

Teniendo en cuenta el tratamiento térmico aplicado a la leche, en España la leche más consumida es la UHT, siendo un 96% del total, la segunda leche más consumida es la pasteurizada con un 3% y por último la leche cruda que supone un 1% [10].

El mercado mundial de la leche blanca UHT está en torno a 90 000 millones USD; un testimonio de su posición como una de las categorías lácteas más rentables y estables. Esto representa una oportunidad significativa para captar una demanda constante en un mercado creciente y resiliente. La leche blanca UHT continúa ofreciendo retornos confiables, registrando una Tasa de Crecimiento Anual Compuesto (TCAC) estable de más del 3 % entre 2022 y 2024. Este valor se interpreta como una categoría de bajo riesgo y sólida, no resulta una moda pasajera sino una categoría que mantiene su demanda constante. Su larga vida útil y amplio atractivo para el consumidor la convierten en una elección confiable para los productores lecheros [40]. Según los datos del MAPA, la leche UHT representa aproximadamente el 96% del total de leche líquida consumida en España, frente a un escaso 3% de la leche pasteurizada.

3.2 Mercado de productos sin lactosa

El artículo publicado por Dekker, demuestra que los productos sin lactosa superan el crecimiento de los lácteos tradicionales, creciendo a un ritmo del 7,3 % (Figura 6), lo que triplica el crecimiento del sector lácteo tradicional [42]. Mientras que el mercado global de productos lácteos crece apenas un 4%, el segmento sin lactosa ha experimentado un crecimiento del 9,2%, alcanzando los 466 millones de euros en 2022 [43].

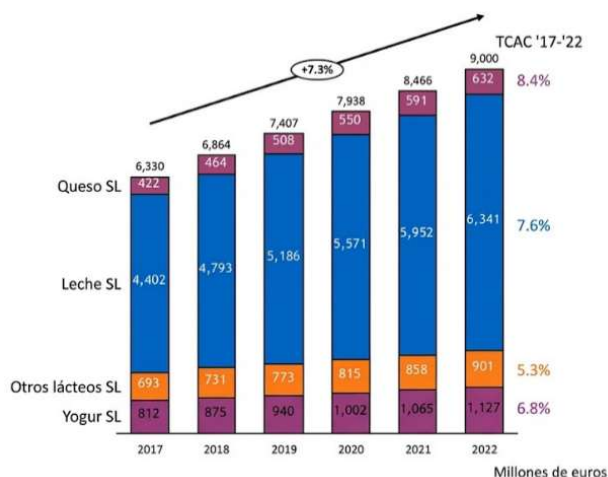


Figura 6. Estimación de la tasa de crecimiento anual compuesto (TCAC) del segmento de mercado de lácteos sin lactosa durante el periodo 2017-2022. Se indica la facturación anual total en M€. SL: sin lactosa [42]

El Informe Global de Foodcom estima que el mercado rondaba los 13.900 millones de dólares en 2025. Se espera que el mercado supere los 20.000 millones de dólares para 2030, pudiendo rozar los 29.000 millones en 2034. La leche para beber es, con diferencia, la categoría más grande; representa dos tercios (aproximadamente el 66 %) de todo el mercado sin lactosa y es el principal motor del crecimiento absoluto de este sector [44]. La leche sin lactosa es la categoría estrella. Ya supone el 13% de los litros de leche envasada en España y, al ser un producto de mayor valor añadido, alcanza el 15% del peso del mercado en valor económico.

La Figura 7 muestra empresas que se han expandido a la producción de lácteos sin lactosa. Los finlandeses tienen una prevalencia relativamente alta de intolerancia a la lactosa en Europa, con un 17 %, lo que propició la temprana popularidad de los productos sin lactosa. Valio, la mayor empresa finlandesa de alimentos y lácteos fue la primera empresa de lácteos sin lactosa del mundo, lanzando su primera leche sin lactosa en 2001. La empresa sueca Arla Foods poseía más de 30 marcas, incluyendo la reconocida Lactofree.

Ya en 2010, China producía tan solo 300.000 toneladas de leche sin lactosa, lo que representaba el 1% de la leche líquida. Las empresas lácteas chinas también han incrementado la producción de productos sin lactosa. Por ejemplo, Monmilk Xinyangdao obtuvo la certificación de la Red Global de Intolerancia a la Lactosa (LIGN) en 2017, convirtiéndose en la primera marca de lácteos sin lactosa de China certificada por esta organización internacional. Todos estos esfuerzos están impulsando la generalización, estandarización y mejora de la salud de los productos sin lactosa. La empresa china Mengniu Dairy tiene la mayor participación de mercado en el mercado de leche UHT con aproximadamente el 13,6% [45].

Suiza	 Nestlé 
Finlandia	 Valio 
Suecia	 Arla 
España	 COVAP  Central Leche Asturiana   Kaiku   Pascual 
China	 Yili (伊利)   Mengniu (蒙牛) 

Figura 7. Marcas representativas de productos lácteos sin lactosa de algunos países. [46]

A medida que el mercado de productos sin lactosa se expande, la claridad en el etiquetado se ha vuelto un factor crítico para la seguridad y confianza del consumidor. Como nos comentó Oriol Sans, en España, ADILAC ha sido pionera en la protección de este colectivo. Sin embargo, ante la globalización del mercado lácteo, las iniciativas locales han dado el salto al ámbito internacional.

En el año 2015, bajo la promoción directa de ADILAC, nació LIGN (Lactose Intolerance Global Network), una red global cuyo objetivo principal es conectar a organizaciones y consumidores de todo el mundo para buscar soluciones comunes y estandarizar la identificación de estos productos bajo una misma identidad gráfica (Figura 8). Esta iniciativa busca expandir un etiquetado seguro y reconocible a nivel mundial, operando e impulsando certificaciones en países como Italia, Francia, Argentina, Uruguay, México, Perú y China.



Figura 8. Sello oficial de la asociación española ADILAC (izquierda) y distintivo de la marca global LIGN (derecha). [47]

4 TECNOLOGÍAS DEL DESLACTOSADO

Si bien los productos lácteos fermentados son naturalmente bajos en lactosa, existe una creciente demanda de productos completamente deslactosados. Para producir estos productos completamente libres de lactosa, existen diferentes enfoques tecnológicos. Estos se pueden dividir, en dos: (1) eliminar la lactosa de la leche y (2) descomponer la lactosa de la leche en glucosa y galactosa. En la mayoría de los casos, se aplica una combinación de ambos métodos.

4.1 Separación enzimática

El proceso de filtración por membrana representa una metodología tecnológica fundamental en la industria láctea para el fraccionamiento de los componentes de la leche. En una primera fase, la leche desnatada se somete a un proceso de ultrafiltración (UF), el cual permite separar las proteínas de alto peso molecular. Como resultado de esta etapa, se genera una corriente primaria o contenido retenido que es rico en proteínas, pero pobre en lactosa y sales. De forma paralela, la ultrafiltración expulsa un permeado que concentra la mayor parte de la lactosa y los minerales que fueron separados del producto original [48].

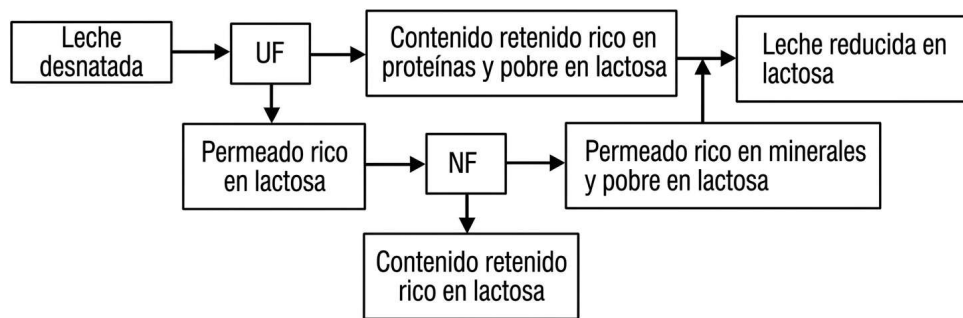


Figura 9. Combinación de ultrafiltración (UF) y nanofiltración (NF) para obtener leche baja en lactosa [49]

Para evitar la pérdida del valor nutricional derivado de las sales minerales, el permeado rico en lactosa se somete a una segunda etapa de separación mediante nanofiltración (NF). Esta membrana de mayor selectividad permite dividir este flujo secundario en dos fracciones distintas: un nuevo retenido altamente concentrado en lactosa y un permeado rico en minerales, pero con bajos niveles de este azúcar. Tal y como se describe en la Figura 9, la estrategia consiste en recombinar el retenido de la ultrafiltración (fuente principal de proteínas) con el permeado de la nanofiltración (fuente de minerales). Esta mezcla produce una leche reducida en lactosa que logra conservar el perfil proteico y mineral de la leche original [50].

A pesar de la eficiencia térmica y nutricional de este sistema acoplado, la obtención de un producto lácteo totalmente deslactosado mediante el uso exclusivo de membranas presenta notables limitaciones técnicas. En la práctica industrial, el proceso se diseña habitualmente para eliminar aproximadamente el 50 % del contenido inicial de lactosa. Separar la lactosa físicamente implica el uso de varias membranas de filtración, a menudo acopladas en sistemas en cascada con nanofiltración o electrodiálisis. Esto conlleva una inversión económica elevada y maquinaria muy especializada [51].

A modo de síntesis, y para evaluar la viabilidad de la implementación de esta tecnología frente a la hidrólisis enzimática, la Tabla 3 recoge las principales fortalezas operativas y los retos técnicos limitantes asociados al fraccionamiento lácteo por membranas.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de separación por membranas

Ventajas	Desventajas
• Eficiencia Nutricional • Versatilidad • Bajo impacto térmico	• Ensuciamiento • Compromiso selectividad-permeabilidad • Dificultad con minerales • Necesidad de Tecnologías auxiliares

4.2 Hidrólisis enzimática

El proceso de hidrólisis enzimática de la lactosa es un proceso de gran interés tecnológico ya que causa mínimos daños a los componentes nutricionales y es fácilmente absorbido por el intestino humano. Para la producción de leche sin lactosa, se utilizan principalmente dos procesos: por lotes y en línea. La secuencia lógica y los parámetros técnicos de ambos métodos se representan en la Figura 10. Diagrama de procesos para métodos de hidrólisis, donde se detallan las etapas de tratamiento térmico y los tiempos de almacenamiento asociados [52].

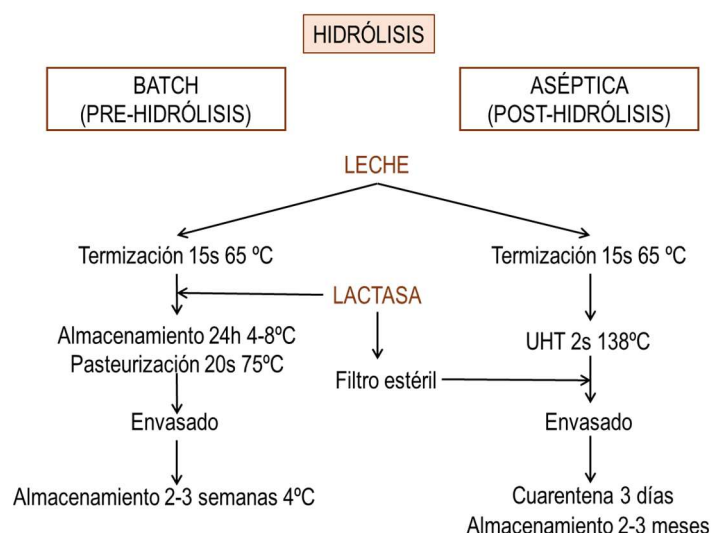


Figura 10. Diagrama de procesos para métodos de hidrólisis.

4.2.1 Dosificación en lote o batch (pre-hidrólisis)

En el método por lotes, la hidrólisis se lleva a cabo mediante la adición de lactasa neutra directamente al tanque de leche, generalmente tras una etapa inicial de termización (65 °C por 15 segundos). La reacción ocurre durante un periodo de almacenamiento de aproximadamente 24 horas a temperaturas de refrigeración entre 4 y 8 °C, lo que garantiza la estabilidad microbiológica mientras se alcanza la hidrólisis completa. Una particularidad crítica de este sistema es que la reacción enzimática ocurre antes del tratamiento térmico final. Debido a las bajas temperaturas de operación, la eficiencia cinética de la enzima es menor, lo que tradicionalmente ha exigido dosis elevadas de lactasa. No obstante, una vez finalizada la hidrólisis, la leche se somete a pasteurización (75 °C por 20 segundos) para inactivar la enzima y asegurar la inocuidad antes del envasado. El producto resultante tiene una vida útil de aproximadamente 2 a 3 semanas bajo refrigeración [53].

El sistema por lotes es discontinuo y obliga a la fábrica a ocupar y bloquear grandes tanques de almacenamiento durante un día entero. Además, la enzima se añade a la leche cruda o termizada en grandes tanques y debe almacenarse a temperaturas de refrigeración para evitar el crecimiento bacteriano, dado que la leche aún no está esterilizada.

Desde la perspectiva de la organización industrial, el diseño discontinuo presenta ineficiencias logísticas inherentes. La exigencia de retener el producto durante 24 horas inmoviliza grandes volúmenes de activos de la planta (tanques encamisados) y genera cuellos de botella que limitan la capacidad máxima de producción. A

modo de síntesis comparativa, la Tabla 4 evalúa las fortalezas en el control del proceso y las penalizaciones operativas que definen el rendimiento de la tecnología de dosificación en lote.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de dosificación en lote o batch

Ventajas	Desventajas
• Mayor control del tiempo de hidrólisis • Desarrollo limitado de sabores extraños	• Proceso lento debido a la baja temperatura • Necesidad de tanque de hidrólisis • Mayor consumo de enzima

4.2.2 Dosificación en línea (post-hidrólisis)

El proceso aséptico difiere fundamentalmente en la secuencia de las etapas de tratamiento térmico y enzimático, permitiendo una mayor eficiencia logística. La leche se somete primero a una esterilización mediante el sistema UHT. Posteriormente, se realiza una inyección de lactasa estéril, previamente filtrada, en la corriente de leche justo antes del envasado. Este método permite reducir la dosificación de la enzima al no ser inactivada por el calor inmediato, presenta desafíos técnicos considerables, como la necesidad de equipamiento especializado para garantizar la asepsia. Dado que la enzima permanece activa dentro del envase, el proceso de hidrólisis continúa durante el almacenamiento comercial, permitiendo que el producto se mantenga estable de 2 a 3 meses a temperatura ambiente [54].

El proceso es ideal porque se adapta orgánicamente a la cadena de suministro UHT existente: tras envasar la leche asépticamente, los palés de producto terminado pasan de todos modos por un periodo de cuarentena obligatoria en el almacén a temperatura ambiente, que dura habitualmente unos 3 días. El fabricante aprovecha este tiempo "muerto" para que la enzima lactasa realice su reacción química completa en el interior del brik de cartón. Así, no se gasta energía extra en refrigeración prolongada de tanques ni se detienen las líneas de procesamiento, logrando un producto final de alta calidad y reduciendo significativamente la factura operativa [55].

A modo de síntesis, en la Tabla 5 se exponen los principales beneficios técnicos y los compromisos operativos inherentes a la implantación de este sistema de inyección en línea frente a la dosificación tradicional en tanque.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de la dosificación en línea

Ventajas	Desventajas
• Reducción del tiempo total de producción • No se necesita tanque de hidrólisis • Menor consumo de enzimas	• Menor control del tiempo de hidrólisis • Necesidad de una enzima de alta pureza para limitar sabores desagradables

CAPITULO II PROCESOS

5 PROCESO DE ELABORACIÓN

El proceso industrial que se describe es para la elaboración de leche UHT sin lactosa, empleando tecnología de dosificación aséptica en línea, operando en un régimen continuo de 20.000 L/h.

En la Figura 11 se expone de forma gráfica y estructurada el diagrama de bloque del proceso. Esta representación visual permite identificar de manera intuitiva la secuencia de fabricación y las etapas fundamentales necesarias para garantizar los estándares del producto final.

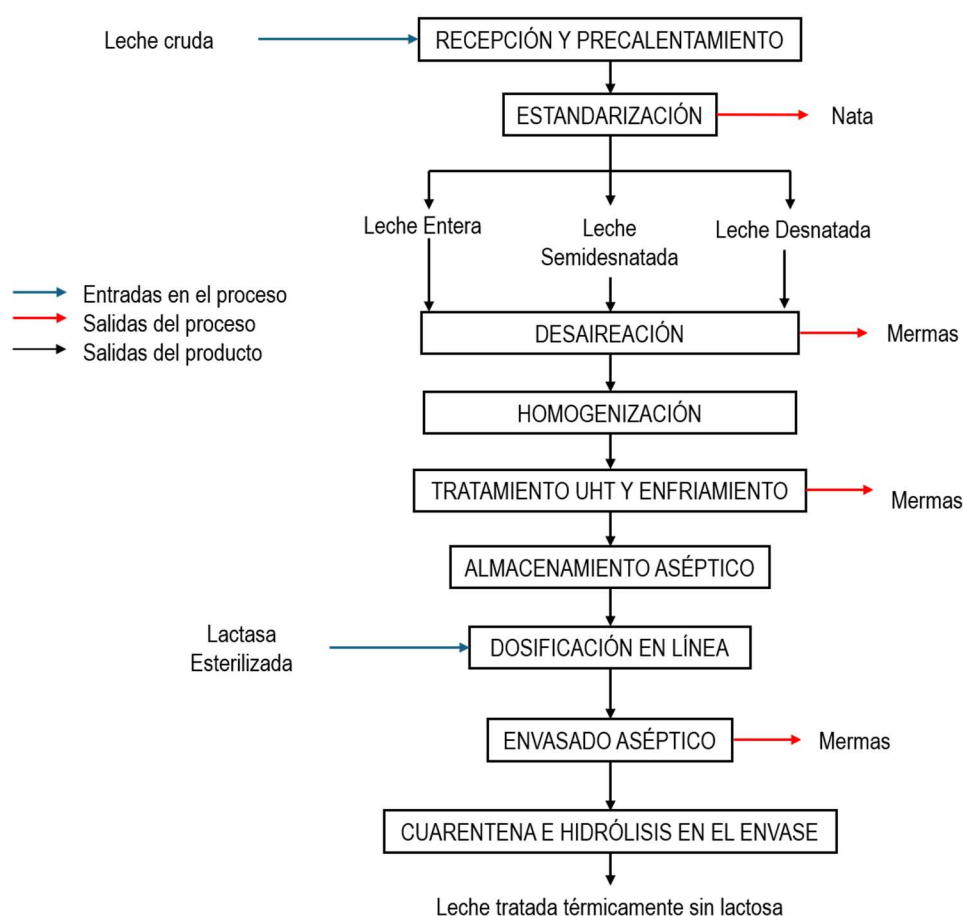


Figura 11. Diagrama de bloques del proceso productivo

5.1 Recepción y precalentamiento

La leche se recoge en las explotaciones ganaderas en camiones cisterna. Durante el manejo de la leche cruda, es importante evitar la agitación y las lesiones mecánicas de los glóbulos grasos, cuya rotura tiene efectos muy negativos sobre la calidad de los productos que se van a elaborar con esa leche. La membrana de los glóbulos grasos se lesiona por efecto de las fuerzas de cizalla generadas durante la agitación y la grasa libre queda expuesta a la acción de las lipasas en la fase acuosa de la leche.

La leche se envía a los silos de almacenamiento empleando bombas centrífugas para causar los mínimos daños

posibles a los glóbulos grasos y el llenado se realiza por la parte inferior para evitar la agitación y la formación de espuma. Antes de llegar a los silos, la leche cruda pasa a través de un filtro tupido en el que quedan retenidas las partículas extrañas de tamaño de 0,5 mm o superior.

Una bomba centrífuga impulsa la leche a la primera sección regenerativa del intercambiador, donde eleva su temperatura aprovechando el calor cedido por la leche que ya ha sido procesada. En caso de que la leche se caliente a una temperatura elevada, y se mantenga por un tiempo prolongado, se oscurece y empieza a cambiar su sabor a caramelizado. Este proceso se conoce como caramelización y es el resultado de una reacción química entre la lactosa y las proteínas llamada reacción de Maillard. Este cambio de color y sabor también lleva a una pérdida del valor nutricional de la lisina, uno de los aminoácidos esenciales [56].

5.2 Desaireación

En la industria láctea, la presencia de gases disueltos en la leche cruda actúa como un contaminante físico que compromete la calidad final del producto. Al igual que en los ensayos de disolución farmacéutica, donde la acumulación de burbujas interfiere con la precisión de los resultados, en el procesamiento de lácteos el aire atrapado favorece la formación de espuma, dificulta la exactitud en el llenado y genera barreras que aceleran la oxidación lipídica y el ensuciamiento en los intercambiadores de calor.

Para mitigar estos efectos, la leche precalentada se somete a un sistema de desaireación bajo presión reducida, lo que induce la expansión y extracción de los gases volátiles por la parte superior del equipo. A través de este enfriamiento súbito a vacío, se elimina aproximadamente el 6 % del volumen gaseoso, evitando así reacciones oxidativas indeseadas durante los tratamientos térmicos UHT posteriores. Este procedimiento conlleva además la evaporación controlada de una pequeña porción de agua [57].

5.3 Estandarización y clarificación

El proceso de estandarización, también denominado normalización, es una etapa operativa crítica en la industria láctea que garantiza la uniformidad composicional del producto final. Su objetivo fundamental es ajustar el contenido de grasa de la leche a un estándar preestablecido (por ejemplo, 3,5 % para leche entera), manteniendo invariables el resto de los componentes sólidos, como las proteínas y minerales. Para llevarlo a cabo, la leche cruda se somete a una fuerza centrífuga elevada dentro de una separadora centrífuga hermética operada en caliente.

Durante esta operación, la máquina divide el flujo de leche en dos corrientes diferenciadas: la nata (fase grasa) y la leche desnatada (fase magra). De manera simultánea a este fraccionamiento, el equipo realiza una labor de clarificación, donde una tubería de purga específica evacua los sólidos residuales, sedimentos e impurezas que puedan estar presentes en la leche cruda. Una vez fraccionada, el sistema reinyecta automáticamente una porción exacta de la nata en el flujo de leche desnatada para alcanzar el nivel de materia grasa objetivo, mientras que el excedente de nata es desviado para la elaboración de otros derivados, como mantequilla o nata de mesa. Este control preciso, automatizado y continuo permite obtener un producto con propiedades fisicoquímicas estandarizadas, crucial para el cumplimiento de las normativas de etiquetado y la consistencia sensorial exigida por el mercado.[58]

5.4 Homogenización

El objetivo principal es reducir mecánicamente el diámetro de los glóbulos grasos (que en la leche cruda pueden medir entre 1 y 15 μm) hasta un rango uniforme de menos de 1-2 μm . Al disminuir el tamaño de estas partículas, se incrementa drásticamente el área superficial de la grasa y se reduce su velocidad de ascenso (según la Ley de Stokes), evitando así la formación de la capa de nata en la superficie del envase.

El proceso se lleva a cabo mediante homogeneizadores de alta presión, que consisten en bombas de pistones que fuerzan la leche a pasar a través de una válvula de homogeneización con una ranura extremadamente estrecha. La combinación de turbulencia, cavitación y fuerzas de cizalla de alta intensidad provoca la ruptura de los

glóbulos grasos originales. Tras la ruptura, la nueva membrana de cada glóbulo graso se recubre inmediatamente con proteínas (caseínas y proteínas del suero) presentes en la leche, lo que impide que los glóbulos recién formados se vuelvan a agrupar.

La leche se introduce en unas válvulas que mediante un incremento de presión rompen los glóbulos de grasa. Este proceso aporta ventajas como:

- Estabilidad física: elimina la separación de grasa, garantizando una distribución uniforme durante toda la vida útil.
- Propiedades organolépticas: El aspecto de la leche es más blanquecina y opaca, lo cual es preferido por consumidores.
- Digestibilidad: Al reducir el tamaño de partículas de los glóbulos, la distribución de la caseína es más fina y se termina digiriendo con mayor facilidad.
- Resistencia a la oxidación: Aunque, al tener mayor superficie grasa expuesta sugiere mayor oxidación, la uniformidad de la emulsión aumenta la estabilidad global frente a procesos oxidativos.

5.5 Tratamiento térmico UHT y enfriamiento

La leche homogeneizada se dirige hacia la sección de calentamiento principal, donde se somete a un tratamiento de ultra alta temperatura (UHT), oscilando típicamente entre los 137 °C y los 140 °C. Este proceso se ejecuta mediante un tubo de retención que garantiza un tiempo de contacto extremadamente breve, de apenas 2 a 5 segundos, representando la pendiente en la gráfica de la Figura 12. Este choque térmico es clave para asegurar la esterilidad comercial del producto, permitiendo la destrucción de todos los microorganismos patógenos y esporas bacterianas.

Inmediatamente después de este tiempo de retención, la leche se somete a un enfriamiento súbito para detener cualquier reacción química residual inducida por el calor. El fluido retorna primero a la sección de regeneración, donde transfiere gran parte de su energía térmica a la leche fría que ingresa al sistema, optimizando así la eficiencia energética. Posteriormente, el producto atraviesa una fase final de enfriamiento con agua helada, la cual reduce la temperatura rápidamente hasta alcanzar un rango de 20 °C a 25 °C. Este protocolo de temperaturas asegura que el producto final preserve su integridad nutricional.[59]

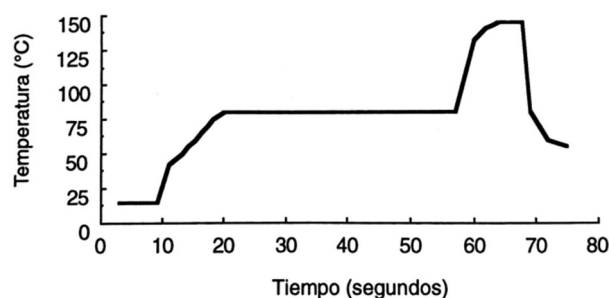


Figura 12. Flujo óptimo del proceso en el sistema indirecto UHT [60]

5.6 Almacenamiento aséptico

Tras el tratamiento UHT y su enfriamiento, la leche es conducida a un tanque pulmón o amortiguador de gran capacidad, diseñado para garantizar la continuidad operativa de la planta. Este depósito absorbe las fluctuaciones de flujo o paradas temporales de las envasadoras sin alterar las condiciones térmicas del producto. Para preservar la integridad aséptica, el interior del tanque se mantiene bajo una atmósfera de sobrepresión con aire estéril filtrado, creando una barrera absoluta frente al entorno; además, el monitoreo del nivel se realiza exclusivamente mediante sensores de presión diferencial, evitando el uso de dispositivos mecánicos invasivos que comprometerían la higiene del sistema.

5.7 Dosificación enzimática en línea

Una vez estabilizado el flujo en el almacenamiento, se procede a la inyección controlada de lactasa. Este paso se ejecuta mediante un sistema de dosificación que incorpora una dosis continua y exacta de la enzima directamente en la tubería aséptica. Para asegurar la máxima inocuidad, la solución enzimática se somete previamente a una esterilización mecánica en frío mediante microfiltración con membranas de 0,22 μm ; este filtro de grado absoluto retiene cualquier microorganismo sin afectar la actividad catalítica de la enzima. La adición de la lactasa en esta etapa final, posterior al almacenamiento, es una estrategia clave: al evitar la presencia de enzimas en el tanque pulmón, se previene una hidrólisis incontrolada y se simplifican significativamente los protocolos de limpieza y desinfección (CIP) de toda la instalación. Durante todo el proceso de almacenamiento, se garantiza la preservación de la esterilidad mediante un sistema de sobrepresión con aire estéril, que actúa como una barrera protectora frente al entorno.

5.8 Envasado aséptico

Después de la inyección enzimática, la mezcla de leche y lactasa ingresa a la máquina llenadora, donde el proceso se desarrolla bajo una atmósfera estrictamente controlada y estéril. Este equipo opera bajo una atmósfera controlada y estéril. Paralelamente, el material de envasado (generalmente cartón multicapa) es esterilizado mediante baños de peróxido de hidrógeno y secado.

5.9 Cuarentena e hidrólisis en el envase

A diferencia de los métodos tradicionales en tanque (por lotes), en el sistema en línea la verdadera reacción bioquímica ocurre una vez finalizado el proceso industrial. Los envases ya sellados y paletizados ingresan a un periodo de cuarentena a temperatura ambiente que dura, entre 2 y 3 días. Durante este tiempo de reposo, la enzima actúa en el interior del cartón, hidrolizando los enlaces glicosídicos de la lactosa para transformarla en sus monosacáridos: glucosa y galactosa. Simultáneamente, este periodo sirve como incubación obligatoria para que el departamento de control de calidad verifique la esterilidad microbiológica y confirme que la lactosa residual cumple con el límite legal antes de liberar el producto al mercado.

6 EQUIPOS PRINCIPALES

En la industria láctea, la producción de leche UHT sin lactosa requiere una estricta integración de equipos especializados para preservar las propiedades organolépticas y nutricionales del producto, cumpliendo con los más altos estándares de calidad e inocuidad alimentaria. Este apartado detalla las características técnicas de la maquinaria principal de la planta, abarcando desde la recepción y tratamiento térmico, hasta la dosificación aséptica de la enzima y el envasado final.

Por exigencias sanitarias, todos los componentes en contacto directo con la leche están fabricados con materiales no reactivos, destacando el uso de acero inoxidable. Su gran resistencia mecánica, térmica y a la corrosión resulta indispensable para garantizar la máxima higiene, soportar los ciclos de limpieza automatizados y evitar cualquier riesgo de contaminación.

A continuación, se presentan los equipos específicos del proceso, describiendo sus funciones y características técnicas más relevantes.

6.1 Camiones cisterna

El diseño y fabricación de las cisternas destinadas a la recogida de leche se rigen por las directrices de la Federación Internacional de Lechería (FIL). Como se observa en la Figura 13, estos vehículos consisten en depósitos cilíndricos de acero inoxidable que, dependiendo de su capacidad volumétrica, pueden estar divididos en varios compartimentos internos.

Para garantizar el mantenimiento de la cadena de frío durante el transporte, la envolvente del tanque cuenta con aislamiento térmico. El conjunto, montado sobre el chasis del camión, integra toda la instrumentación necesaria para las operaciones de carga y descarga, incluyendo mangueras y válvulas. Por último, la cisterna incorpora un sistema automatizado de limpieza (CIP) que permite mantener el interior del equipo en perfectas condiciones higiénicas tras cada uso.



Figura 13. Camión cisterna isotérmico compartimentado de acero inoxidable para el transporte de leche cruda [61]

6.2 Tanques silos

Estos grandes depósitos requieren un sistema de agitación que evite la separación de la nata por gravedad. Dicha agitación debe ser extremadamente suave, ya que una agitación violenta provoca la aireación de la leche y la desintegración de la membrana de los glóbulos grasos. Esto último deja la grasa expuesta al ataque de las enzimas lipasas, lo que altera negativamente las propiedades organolépticas del producto. Por tanto, mantener una agitación suave es una regla fundamental en el tratamiento de la leche.

El diseño estándar cuenta con un agitador de hélice; sin embargo, en depósitos de gran altura, puede ser necesaria la instalación de dos agitadores a distintos niveles para garantizar una homogeneización efectiva.

En climas cálidos, el sol y la temperatura ambiente pueden elevar la temperatura de la leche almacenada en

depósitos exteriores por encima de los límites permitidos. Para mitigar este efecto, los tanques deben estar aislados. Si bien lo ideal es que la pared exterior sea de acero inoxidable, por razones económicas puede utilizarse acero al carbono recubierto con pintura anticorrosiva.

Finalmente, para facilitar el drenaje completo del producto, el fondo del depósito presenta una inclinación del 6% hacia la salida. Los silos integran diversos tipos de agitadores, sensores y equipos de control para asegurar la correcta gestión del almacenamiento.

6.3 Intercambiador de placas

Se ha seleccionado un intercambiador de calor de placas (PHE) de acero inoxidable AISI 316, material estándar en el sector lácteo por su resistencia a la corrosión y adaptabilidad a la limpieza *in situ* (CIP). Estructuralmente (Figura 14), consta de un paquete de finas placas metálicas (0,5 - 0,9 mm) suspendidas en una barra superior, alineadas entre placas de inicio y extremo. El conjunto se comprime con pernos entre un bastidor fijo y uno móvil que permite el acceso para su mantenimiento.

El intercambio térmico se da en las placas, cuyo perfil corrugado (patrón en espiga) cumple tres funciones: soportar altas presiones diferenciales, mantener canales de flujo estrechos (2 - 4 mm) e inducir alta turbulencia para maximizar la eficiencia térmica y retrasar las incrustaciones.

Los líquidos fluyen en rigurosa contracorriente por canales alternos sellados con juntas. La leche fría entra a 6 °C y circula aislada del fluido calefactor, sin posibilidad de contaminación cruzada. Para alcanzar los 70 °C, el equipo incluye una sección de regeneración térmica donde la leche pasteurizada saliente cede su calor a la entrante, logrando una recuperación energética del 90-95 % y reduciendo drásticamente la demanda de servicios auxiliares.

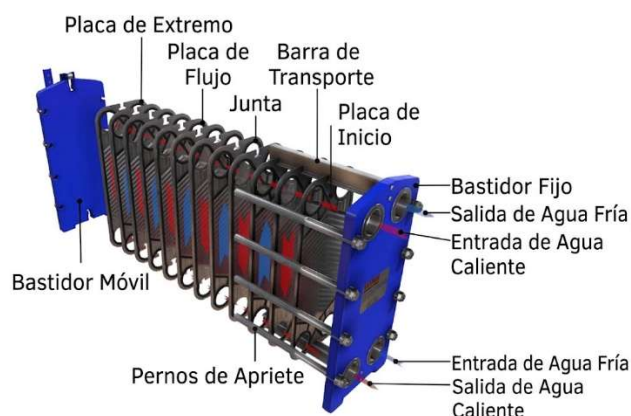


Figura 14. Componentes de intercambiador de placas [62]

6.4 Separador centrífugo en caliente

La centrífuga desnatadora (Figura 15) opera mediante separación centrífuga continua, empleando un rotor hermético accionado por un eje vertical de altas revoluciones para fraccionar la leche por diferencia de densidad. Su elemento fundamental es el paquete de discos, el cual incrementa el área efectiva de clarificación al acortar la trayectoria de separación de los glóbulos de grasa. El conjunto mecánico se aloja en un bastidor equipado con lubricación por neblina de aceite para minimizar el desgaste y las vibraciones.

Durante la operación, la leche cruda se distribuye por los canales de los discos. El campo centrífugo desplaza la fase pesada (leche desnatada) hacia la periferia y la fase ligera (nata) hacia el centro. Al tratarse de un diseño hermético, el rotor permanece completamente lleno de fluido, eliminando la interfase aire-líquido para prevenir la oxidación y el espumado. Esta configuración permite extraer la nata directamente por el eje central, garantizando concentraciones de grasa elevadas y estables.

El equipo integra un mecanismo de autolimpieza de fondo deslizante que actúa como válvula hidráulica.

Accionado por agua de maniobra, se abre verticalmente de forma momentánea para descargar los lodos y sedimentos periféricos sin interrumpir el flujo productivo. Finalmente, la regulación del contenido graso se ajusta controlando la contrapresión en las salidas, transformando la energía cinética del fluido en presión estática para asegurar una descarga precisa.



Figura 15. Separador centrífugo modelo A Series [63]

6.5 Desaireador

Este equipo consta de una cámara cilíndrica operada bajo presión negativa (vacío), diseñada para el tratamiento de líquidos precalentados. A través de un proceso de evaporación súbita, el sistema extrae el oxígeno disuelto y los compuestos volátiles del producto.

Aunque en la industria se denomina comúnmente desaireador debido a su finalidad operativa, su fundamento termodinámico radica en la evaporación. Cuando el producto ingresa a la cámara de vacío, la presión disminuye súbitamente, provocando que el punto de ebullición descienda por debajo de la temperatura del fluido. Para alcanzar un nuevo equilibrio termodinámico, una fracción del agua contenida en el producto se evapora instantáneamente. Este cambio de fase arrastra consigo:

- Oxígeno disuelto: Evita la oxidación, protege el contenido vitamínico y minimiza la formación de depósitos en los equipos posteriores.
- Compuestos volátiles: Elimina olores y sabores anómalos originados en la materia prima.

Como se ilustra en la Figura 16, la alimentación ingresa a través de un difusor que pulveriza el fluido en múltiples chorros o una película fina, maximizando así la superficie de contacto. Una vez dentro de la cámara, ocurre la ebullición instantánea. Representado en líneas azules, la fase líquida (leche), ahora desgasificada y con un ligero descenso térmico, se acumula en el fondo del equipo para su posterior bombeo. Mientras que las líneas rojas, la fase gaseosa (vapor generado), cargado con el oxígeno y los gases volátiles extraídos, es succionado hacia el sistema de vacío por la parte superior.

Para evitar alteraciones en la concentración de sólidos del producto, el vapor extraído suele atravesar un condensador; en muchas configuraciones, el condensado resultante se reintegra al flujo principal, manteniendo el balance de masa constante.

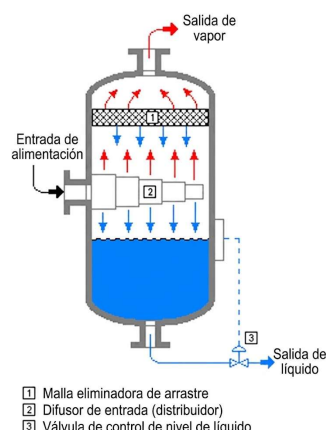


Figura 16. Diagrama de un separador de vapor-líquido [64]

6.6 Homogeneizador

El mecanismo de un homogeneizador se fundamenta en un sistema de bombeo de pistones de alta presión que empuja el fluido a través de una válvula de precisión, provocando la disrupción física de la emulsión. Al ser forzado a pasar por la ranura existente entre el asiento y el forzador de la válvula, el líquido sufre una aceleración violenta que alcanza cientos de metros por segundo, lo que provoca una caída drástica de la presión estática. Este cambio extremo desencadena dos fenómenos físicos simultáneos: una turbulencia severa que genera micro remolinos con alta fuerza de cizallamiento, y un proceso de cavitación donde la implosión de burbujas de vapor crea potentes ondas de choque mecánicas. Ambos efectos actúan en conjunto en fracciones de milisegundo para fragmentar los glóbulos de grasa originales en micropartículas.

La eficacia de esta fragmentación mecánica y la prevención de la coalescencia (reagrupación de los glóbulos) dependen directamente de las condiciones operativas del equipo, fundamentalmente de la presión de trabajo y la temperatura del fluido a su entrada. Estos parámetros deben ajustarse en función del grado de estabilización requerido por la matriz alimentaria. Tal y como se expone en la Tabla 6, los rangos térmicos y mecánicos estandarizados a nivel industrial varían según la línea de producto; destacando que los tratamientos de larga vida útil, como la leche UHT, exigen presiones más severas y una configuración obligatoria en dos etapas para garantizar la estabilidad térmica y evitar el desnatado durante su almacenamiento prolongado.

Tabla 6. Ejemplos de temperaturas y presiones de homogeneización. [6]

Producto	Temperatura (°C)	Presión, MPa (bar)	Etapas
Leche pasteurizada	60 - 70	10 - 20 (100 - 200)	1
Leche UHT	70 - 80	15 - 25 (150 - 250)	2
Nata (10 - 12 % grasa)	60 - 70	10 - 15 (100 - 150)	1 o 2
Leche evaporada	60 - 70	15 - 25 (150 - 250)	2
Mezcla para helado	70 - 80	15 - 20 (150 - 200)	2
Leche para yogur	65 - 70	20 - 25 (200 - 250)	1 o 2

El recorrido del producto a través del equipo y su correspondiente válvula (Figura 17) se desarrolla en dos etapas principales:

- Fase de bombeo: La leche ingresa a baja presión por el colector de succión. El movimiento alternativo de los pistones introduce el fluido en las cámaras cilíndricas. En la carrera de avance, las válvulas de admisión se cierran y los pistones elevan drásticamente la presión del fluido, canalizándolo verticalmente hacia el conjunto de la válvula homogeneizadora.
- Fase de disrupción: La leche a alta presión es inyectada centralmente hacia el interior de la válvula,

impactando frontalmente contra la pieza superior (forzador). Al impedirse su avance direccional, el flujo cambia bruscamente a una trayectoria radial, siendo forzado a escapar a través de la microscópica ranura anular. Al atravesar este estrecho espacio a velocidades extremas, se generan las fuerzas de cavitación y turbulencia que fragmentan los glóbulos de grasa. Finalmente, el fluido choca con el anillo de impacto perimetral, perdiendo y disipando su energía cinética, para ser posteriormente drenado hacia la tubería de salida.

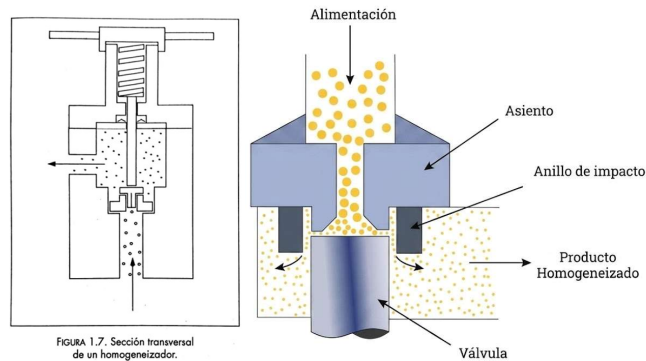


Figura 17. Sección transversal de un homogeneizador (izquierda) y detalle del flujo en la válvula de homogeneización (derecha).

6.7 Intercambiador tubular

Geométricamente, el equipo consta de haces de tubos paralelos (configuración multitubular) y se construye bajo un diseño modular. Estos tubos, generalmente de 6 metros de longitud, se ensamblan en módulos que se interconectan en serie o en paralelo sobre un mismo bastidor estructural (Figura 18). Esta flexibilidad de diseño permite ajustar mecánicamente la velocidad del fluido y la pérdida de carga en las diferentes secciones de la instalación térmica.

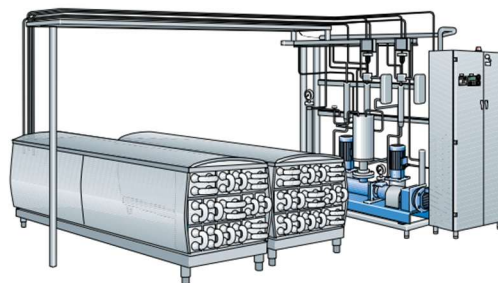


Figura 18. Planta piloto UHT basada en intercambiadores de calor tubulares

Las superficies en contacto directo con los fluidos de proceso se fabrican exclusivamente en acero inoxidable de calidad para recipientes a presión (típicamente AISI 316L), empleando habitualmente tubos sin soldadura. La selección de tubos con perfil corrugado se justifica por su capacidad para inducir un régimen turbulento que destruye la capa límite en la pared del tubo. Este fenómeno termodinámico incrementa radicalmente el coeficiente global de transferencia de calor y asegura una penetración térmica rápida y uniforme, lo que permite minimizar el área física de intercambio requerida para alcanzar la temperatura objetivo.

Esta alta eficiencia térmica, impulsada por la corrugación y por un diseño de cabezales flotantes libres de intersticios, viabiliza operativamente la configuración de Regeneración Producto a Producto (P2P), tal y como se detalla en la sección transversal de la Figura 19. En esta disposición, el fluido caliente saliente circula a estricta contracorriente por el espacio anular (la zona exterior envolvente), mientras que el fluido frío de entrada viaja por el interior del haz tubular. Al aprovechar la entalpía residual de la corriente de salida para precalentar la alimentación térmica a través de la pared de acero, el sistema reduce drásticamente la necesidad de inyectar vapor de servicio en las etapas de calentamiento y, simultáneamente, minimiza el requerimiento de agua de refrigeración en la sección final.

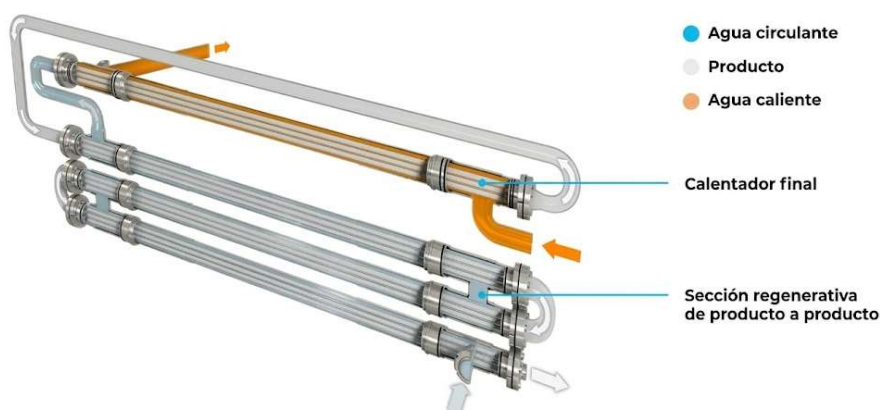


Figura 19. Sección transversal del intercambiador tubular con regeneración P2P

Este ciclo regenerativo directo logra disminuir el consumo energético global de la planta (tanto de demanda térmica como frigorífica) hasta en un 55 % frente a los circuitos convencionales que emplean agua como fluido caloportador intermediario, maximizando así la rentabilidad operativa de la instalación. [65]

6.8 Tubo de retención

La etapa de estabilización térmica, realizada en los tubos de retención (Figura 20), consiste en mantener la leche a 95 °C previo a la esterilización. Esta fase es esencial para prevenir el ensuciamiento causado por la desnaturalización brusca de las proteínas séricas. Al inducir una desnaturalización controlada y gradual, se evita que las proteínas y el fosfato de calcio precipiten sobre las superficies metálicas del equipo a temperaturas extremas (140–150 °C). Esta operación protege la eficiencia de la transferencia térmica, mantiene la estabilidad hidráulica del flujo y asegura la integridad de los componentes fabricados en acero inoxidable AISI 316L.



Figura 20. Sección de tubos de retención empleados para la etapa de estabilización térmica del proceso.[66]

6.9 Tubo de mantenimiento

El tubo de mantenimiento, también denominado celda de retención, garantiza la seguridad microbiológica del producto. Su diseño físico, dispuesto en espiral o zigzag, vinculan la longitud y el diámetro interior con el caudal de la planta, asegurando que la leche permanezca el tiempo exacto bajo temperaturas de esterilización para lograr una eliminación efectiva de microorganismos.

El equipo está fabricado íntegramente en acero inoxidable de grado sanitario, predominantemente AISI 304 o AISI 316L. Esta elección garantiza una resistencia a la corrosión, durabilidad frente a la fatiga mecánica y una respuesta óptima ante las elevadas presiones y temperaturas del proceso, cumpliendo con los más estrictos estándares higiénicos. Finalmente, el conjunto integra una cubierta protectora externa de acero inoxidable que cumple una doble función estratégica: actúa como una barrera aislante que minimiza las pérdidas térmicas por radiación, optimizando así la eficiencia energética del sistema, y constituye un elemento de protección laboral indispensable que previene quemaduras accidentales en los operarios durante la operativa diaria.

6.10 Unidad de dosificación aséptica

El tamaño de poro de 0.22 μm es el estándar universal en microbiología y farmacia para la filtración esterilizante. A ese tamaño, el filtro retiene físicamente todas las bacterias, levaduras y esporas. La unidad toma la solución de enzima lactasa, la hace pasar a presión por este microfiltro de 0.22 micrones y, al salir por el otro lado, la enzima ya es comercialmente estéril y se inyecta directamente en la tubería aséptica de la leche.

Como se ilustra en la Figura 21, la unidad de dosificación de lactasa es un sistema de alta precisión fabricado fundamentalmente en acero inoxidable, un material elegido por su excelente resistencia a la corrosión, durabilidad estructural y capacidad para soportar rigurosos procesos de limpieza y esterilización industrial. A nivel técnico e instrumental, las entrañas de esta máquina están compuestas por un depósito de compensación, básculas de alta sensibilidad (celdas de carga), caudalímetros electromagnéticos, un conjunto de válvulas asépticas, una etapa de filtración mecánica (que incluye un prefiltro de 1 micra y un filtro estéril de 0,22 micras) y una bomba peristáltica de desplazamiento positivo.

Su mecanismo de funcionamiento opera mediante un cálculo continuo: el caudalímetro mide el volumen del líquido que transita por la línea principal, mientras que la báscula detecta milimétricamente la diferencia de peso del depósito de enzima para conocer la cantidad exacta que se está consumiendo. Con esta información, el motor de la bomba peristáltica entra en acción apretando mecánicamente una manguera de forma rotativa, lo que fuerza el paso del fluido a través de los filtros y lo inyecta directamente en la cámara mediante una aguja estéril. Se ha elegido este mecanismo peristáltico de circuito cerrado precisamente porque el líquido en ningún momento toca las piezas mecánicas o engranajes de la bomba, lo cual, combinado con un diseño que utiliza barreras de vapor y condensado, garantiza una inyección mecánicamente exacta, repetible y libre de cualquier contaminación externa.



Figura 21. Unidad de dosificación

6.11 Tanque aséptico

El tanque aséptico (Figura 22) es un depósito de acero inoxidable diseñado para almacenar producto esterilizado bajo condiciones de total hermeticidad. Su arquitectura robusta incluye camisas de enfriamiento, celdas de carga para control volumétrico y un complejo sistema de válvulas con barreras de vapor que garantizan el aislamiento frente al exterior. El proceso comienza con la esterilización por vapor directo; para evitar el colapso por vacío

durante el enfriamiento posterior, el sistema inyecta aire estéril o nitrógeno, manteniendo una sobrepresión constante. Este colchón de gas actúa como un pistón neumático que impulsa el fluido hacia las llenadoras, permitiendo una descarga controlada sin recurrir a bombas de succión que pudieran comprometer la esterilidad del circuito.



Figura 22. Tanque de almacenamiento aséptico GEA con colector de válvulas integrado

6.12 Envasadora aséptica

La envasadora aséptica (Figura 23) es un sistema electromecánico diseñado para integrar de forma sincrónica las etapas de desinfección, conformado y sellado del producto. El equipo consta de una unidad de alimentación mediante bobina que suministra el material laminado (ver Tabla 7) hacia un baño de esterilización, donde el peróxido de hidrógeno garantiza la eliminación de la carga microbiana en la superficie del envase. La estructura interna de la máquina incluye un sistema de conformado que genera un cierre longitudinal para transformar la lámina en un cilindro continuo, mientras que una tubería de llenado dosifica el producto lácteo en una atmósfera estéril controlada. La envasadora dispone de mandíbulas térmicas para el cierre transversal, configuradas para sellar por debajo del nivel del líquido, y una sección de plegado final que otorga la geometría definitiva al envase antes de su salida hacia el sistema de montaje automático de cajas. Se ha elegido un equipo que requiera la producción de bebidas lácteas en formato Tetra-Top de 1 litro.

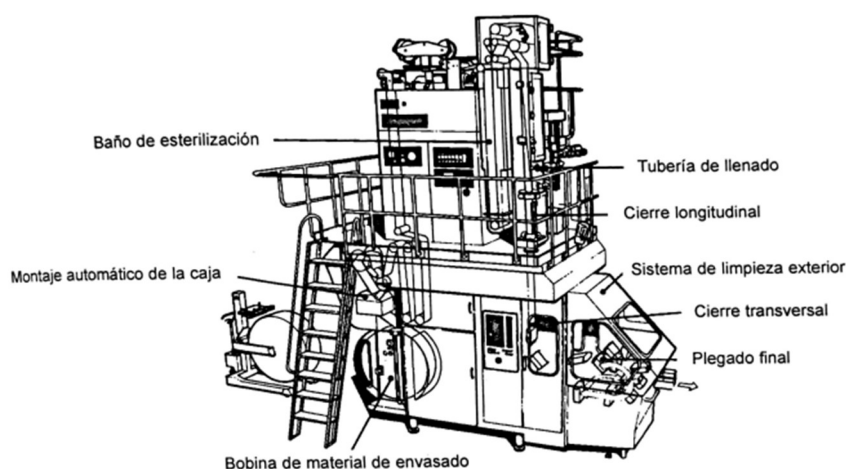


Figura 23. Envasadora aséptica [54]

Tabla 7. Resumen de la composición de laminado [67]

Capa (desde el exterior)	Material	Función Técnica	Proporción en Peso
Capa 1	Polietileno	Protección contra humedad exterior	10%
Capa 2	Cartón	Estabilidad, rigidez e impresión	70-75%
Capa 3	Polietileno	Capa adhesiva de unión	5%
Capa 4	Aluminio	Barrera contra luz, oxígeno y aromas	5%
Capa 5	Polietileno	Capa adhesiva de unión	5%
Capa 6	Polietileno	Sellado interno y protección del líquido	10-15%

En la Figura 24 se explica la línea de proceso que ocurre dentro de la envasadora. Un rollo (1) de cartón laminado se esteriliza a 80 °C en un baño de peróxido de hidrógeno al 17% (2) durante 8-10 segundos, eliminándose los restos del peróxido de hidrógeno con una corriente del aire estéril por filtración. Después, el rollo entra en una cámara aséptica, esterilizada con aire caliente en una cámara aséptica, esterilizada con aire caliente y filtrado. A esta cámara llega la tubería (4) y en ella se conforma el envase, se dispensa el volumen adecuado al alimento, se termosella y luego se corta con guillotinas transversales (5).

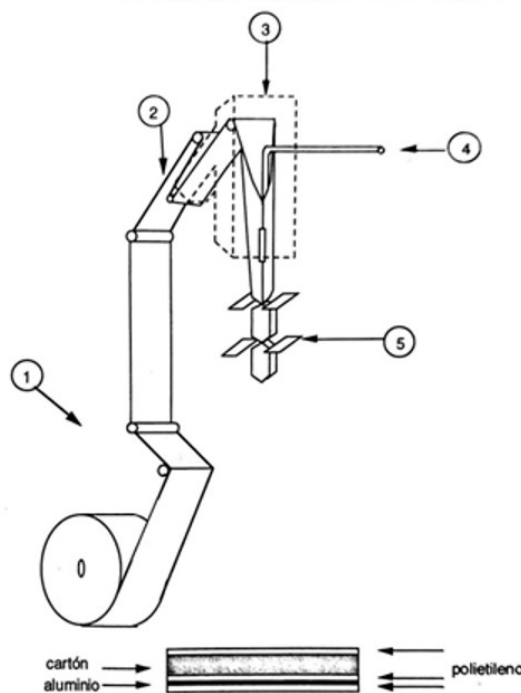


Figura 24. Diagrama de flujo del envasado aséptico [60]

A continuación, se presenta en la Tabla 8 los principales equipos utilizados en el proceso productivo especificando su función principal, características técnicas destacadas y el tipo de combustible o energía que utilizan.

Tabla 8. Resumen de los principales equipos del proceso productivo.

Equipo	Función principal	Características técnicas destacadas	Combustible/Energía
Camiones cisterna	Transporte de leche fría, llenado y vaciado.	Tanques cilíndricos/barril de acero inoxidable, aislamiento térmico, incluye sistema de limpieza CIP.	Combustible diésel
Tanques silos (almacenamiento isotérmico)	Almacenamiento y mantenimiento isotérmico de la leche evitando la separación de nata.	Agitador de hélice para agitación suave, fondo inclinado (6%), aislamiento térmico exterior.	Energía eléctrica
Intercambiador de calor de placas	Precalentamiento, enfriamiento y alta regeneración térmica (hasta 94-95%).	Acero inoxidable AISI 316, placas corrugadas (0,5 - 0,9 mm)	Vapor de agua / Fluido refrigerante / Energía eléctrica
Depósitos intermedios de almacenamiento	Almacenamiento pulmón corto para regular variaciones de caudal en la línea.	Mantiene un nivel constante de fluido, evita la entrada de aire y asegura un flujo ininterrumpido	Energía eléctrica (sistemas de control/bombeo)
Separador centrífugo en caliente (Desnatadora)	Fraccionamiento de fases (separación de nata) y eliminación de sedimentos/impurezas.	Rotor hermético, paquete de discos cónicos, lubricación por neblina de aceite, descarga automática de lodos	Energía eléctrica
Desaireador de vacío	Extracción de oxígeno disuelto y gases volátiles para evitar oxidación y malos olores.	Cámara cilíndrica de baja presión, difusor de entrada, produce evaporación instantánea	Energía eléctrica
Homogeneizador de alta presión	Reducción de glóbulos de grasa para estabilizar la emulsión láctea a largo plazo.	Bomba de pistones, válvula de precisión microscópica (0,1 mm), genera alta turbulencia y cavitación.	Energía eléctrica
Tubo de retención de estabilización	Acondicionamiento termodinámico de proteínas (95 °C) para evitar incrustaciones.	Acero inoxidable 316L, induce una desnaturalización previa y controlada de proteínas séricas.	Energía térmica (del propio fluido)
Tubo de mantenimiento	Retención del fluido a temperaturas de esterilización (139 °C) durante los segundos requeridos (4 seg).	Patrón en espiral o zigzag, acero inoxidable AISI 304/316, campana metálica de protección térmica.	Energía térmica (del propio fluido)
Módulo de tratamiento UHT (Intercambiador tubular)	Esterilización comercial mediante altas temperaturas y regeneración Producto a Producto (P2P).	Tubos corrugados de AISI 316L sin costuras, soporta hasta 200 bar, diseño modular sin deflectores.	Vapor de alta presión
Unidad de dosificación aseptica	Dosificación e inyección exacta, continua y estéril de la enzima lactasa en línea.	Filtro esterilizante de 0,22 µm, celdas de carga, caudalímetros, bomba peristáltica controlada por PLC.	Energía eléctrica
Tanque aseptico	Almacenamiento pulmón temporal de la leche esterilizada previa al envasado.	Presurización constante con aire estéril/nitrógeno, camisa de enfriamiento, celdas de carga, válvulas con barrera de vapor.	Vapor de agua / Aire estéril / Agua fría
Envasadora aseptica	Desinfección, conformado, llenado y sellado de los envases (ej. Tetra-Top).	Baño de peróxido de hidrógeno, mandíbulas térmicas para cierre bajo el líquido, atmósfera estéril.	Energía eléctrica / Vapor / Aire comprimido

7 DESCRIPCIÓN FLUJO DEL PROCESO

La línea de producción de leche UHT sin lactosa se divide en una serie de etapas secuenciales que garantizan la estandarización, estabilización, esterilización y posterior hidrólisis del producto. Las siguientes secciones ilustran las diferentes fases del proceso productivo basándose en el Diagrama de Flujo de Proceso (PFD) del Anexo A.

El proceso productivo comienza con la recepción de la leche cruda, la cual llega a las instalaciones en camiones cisterna (TC-101) a temperaturas de 6 °C a presión ambiente. Desde aquí, es impulsada mediante bombas centrífugas (BL-101), pasando previamente por un filtro (F-101) que retiene las partículas extrañas o impurezas. Una vez filtrada, la leche se almacena en los tanques silos isotérmicos (TK-101), que disponen de agitadores de eje horizontal suave para evitar la separación de la nata. Posteriormente, la leche cruda es enviada a la primera sección del intercambiador de calor de placas (E-101). En esta unidad, el fluido se precalienta hasta alcanzar una temperatura de 60°C aprovechando el calor regenerativo cedido por la leche ya procesada.

La leche precalentada ingresa a la separadora centrífuga en caliente (CS-101). En este equipo, la fuerza centrífuga separa el fluido en dos fases distintas: la nata en la corriente 8 y la leche desnatada en la corriente 7. Una fracción precisa de la nata se reinyecta en la tubería principal para ajustar el nivel de grasa según la línea de producción (entera, semidesnatada o desnatada) con el dispositivo automático de estandarización (AS-101), mientras que el excedente de nata de la corriente 10, es desviado hacia el sistema de pasteurización y silos de almacenamiento para otros usos industriales.

La leche estandarizada se introduce a continuación en el desaireador de vacío (EV-101). Gracias a la acción continua de la bomba de vacío (VP-101), la cámara se mantiene a una presión inferior a la atmosférica, de 0,2 bar absoluta, lo que provoca una ebullición o evaporación instantánea. Este proceso extrae el oxígeno disuelto y los gases volátiles causantes de olores indeseados, protegiendo al producto de la oxidación lipídica y previniendo la cavitación en equipos posteriores. El fluido desaireado baja su temperatura por 9 °C con respecto a su entrada, se acumula en el fondo y es extraído por la bomba (BL-103), cuyo caudal es regulado por una válvula de control de nivel (LCV-101).

A continuación, el fluido entra al homogenizador de alta presión (H-101). Opera con un sistema de compresión extrema para fragmentar los glóbulos de grasa. La compresión principal (1ª etapa) alcanza los 200 bar de presión, seguida de una etapa secundaria a 50 bar para romper grumos, saliendo finalmente el fluido del equipo estabilizado a 1 bar.

Tras salir del homogeneizador, la leche atraviesa un segundo filtro de malla (F-102) que actúa como medida de seguridad para retener cualquier posible coágulo o microgrumo residual que haya podido formarse durante la etapa de presurización. El producto es impulsado hacia el primer intercambiador tubular de regeneración (E-102), donde comienza a calentarse de forma sostenible absorbiendo la energía térmica residual de la leche ya procesada. Al salir por la corriente 19 a una temperatura de 95 °C, el fluido se introduce en el tubo de retención de estabilización de proteínas (TB-101) por 60 segundos.

Seguidamente, la leche circula por la corriente 20 hacia el intercambiador-regenerador intermedio (E-103), elevando aún más su temperatura (121 °C) antes de ingresar por la corriente 21 en el calentador final (E-104). En esta unidad, mediante el aporte externo de vapor de alta presión (corrientes de servicio 22 y 23), la leche recibe el tratamiento térmico principal hasta alcanzar la temperatura ultra alta de esterilización (139 °C). El circuito de agua sobrecalentada debe mantenerse presurizado a 5 bar para evitar que el agua a 145 °C rompa a hervir y se evapore dentro de la carcasa del equipo.

Inmediatamente después, el fluido pasa por la corriente 24 al tubo de mantenimiento o celda de retención (TB-102), donde se previene la disipación térmica y se mantiene al producto a dicha temperatura constante durante un corto tiempo (4 segundos) para asegurar la destrucción completa de microorganismos.

Una vez lograda la esterilización, el producto inicia su enfriamiento progresivo circulando en rigurosa contracorriente y actuando ahora como el medio de calefacción de la línea de entrada: la corriente 25 retorna al intercambiador (E-103), saliendo a 108 °C y, posteriormente, la corriente 26 se introduce en el intercambiador (E-102), cediendo de manera eficiente su energía a la leche fría entrante con una temperatura de salida a 78 °C.

Tras este ciclo de recuperación energética, la corriente 27 se dirige al intercambiador de enfriamiento final (E-105). En este equipo, mediante el uso de agua fría de servicio (corrientes 28 y 29), se reduce la temperatura del producto de forma súbita hasta los 25 °C (corriente 31), deteniendo cualquier daño térmico adicional y dejando la leche en las condiciones óptimas para ser enviada hacia el tanque aséptico (AT-101).

La leche estéril y completamente fría se dirige al tanque aséptico (AT-101). Este depósito actúa como un pulmón amortiguador y se mantiene presurizado con aire estéril para evitar la recontaminación bacteriana. A la salida de este tanque, el producto ingresa a la unidad de dosificación aséptica (DS-101). Aquí, se inyecta en línea la dosis exacta de enzima lactasa de 0,2 g/L directamente en el flujo de la leche.

El producto entra en la máquina envasadora aséptica (EN-101). En esta unidad, se opera a presión atmosférica (1 bar) pero dentro de una cámara cerrada que se mantiene con una ligera sobrepresión (presión positiva) de aire estéril.

El cartón laminado es esterilizado químicamente mediante peróxido de hidrógeno, conformado en forma de envase, llenado con la leche y sellado herméticamente por debajo del nivel del líquido para expulsar todo el oxígeno. Finalmente, por la corriente 36, los envases son agrupados, paletizados y enviados al almacén para pasar un periodo de cuarentena de 2 a 3 días a temperatura ambiente. La enzima lactasa completa su reacción en el interior del brik, hidrolizando totalmente la lactosa en glucosa y galactosa. Por la corriente paralela (corriente 35) salen las mermas que provocan las industrias alimentarias hacia vertidos.

8 GESTIÓN AMBIENTAL

A nivel global, el sector lácteo ejerce un impacto ambiental significativo. A continuación, se establecen las emisiones que genera la planta y su plan de gestión ambiental.

Fuera de las industrias lácteas, según datos de la FAO, los animales lecheros son responsables de la emisión de aproximadamente 3,1 gigatoneladas de CO₂ equivalente al año, proviniendo hasta el 67% de estas emisiones del metano entérico generado durante la rumia de las vacas.

8.1 Emisiones a la atmósfera y selección de combustibles

Las principales emisiones gaseosas de las industrias lácteas se generan en las calderas de producción de vapor o agua caliente necesarios para las operaciones de producción y limpieza. Los contaminantes que se pueden esperar en los gases de combustión son el CO, SO₂ o NO_x y partículas. Los niveles de emisión de estos contaminantes variarán en función del tipo y calidad del combustible utilizado, del estado de las instalaciones, de la eficiencia y control del proceso de combustión.

Los combustibles más empleados en las calderas son de tipo sólido (carbón o madera), líquido (fuel o gasóleo) o gaseoso (gas natural). Para evaluar el impacto de cada alternativa energética, se presenta en la Tabla 9, la comparativa de las propiedades de distintas opciones en el mercado.

Tabla 9. Propiedades medias de algunos combustibles.

Tipo de Combustible	Valor Calorífico (MJ/kg)	Azufre (%)	Cenizas (%)
Carbón	29	2	
Madera	14	-	4-5
Gasóleo 34 seg	45,5	0,75 máx.	0,01 máx.
Fuel 220 seg	43,5	3,2 máx.	0,05 máx.
Gas Natural	37,2 MJ/m ³	Despreciable	Despreciable

A partir de los datos de la tabla, se constata que los combustibles sólidos, como el carbón o la madera, se caracterizan por tener un alto contenido en azufre y cenizas. De forma análoga, los combustibles líquidos como el fuel o el gasóleo presentan un contenido elevado de azufre y tienen una alta posibilidad de producir hollín y partículas perjudiciales derivadas de una combustión incompleta.

Por el contrario, destaca claramente que el gas natural se encuentra exento de azufre y otras impurezas, por lo que su uso no produce emisiones de estos contaminantes atmosféricos. Esto justifica de manera concluyente por qué el diseño de la planta apostará por el uso de gas natural y la futura integración de opciones de cogeneración, limitando al máximo la emisión de contaminantes y reduciendo la huella de carbono de la instalación.

8.2 Generación y gestión de residuos sólidos

La operativa diaria de una planta de procesado lácteo genera diversas corrientes de residuos sólidos y líquidos que requieren una gestión segregada y estrictamente ajustada a la normativa medioambiental vigente. Cuantitativamente, la fracción mayoritaria corresponde a residuos inorgánicos no peligrosos, derivados fundamentalmente de los materiales de envasado, embalaje y operaciones logísticas (plásticos, cartón y madera).

De forma paralela, el funcionamiento integral de la instalación produce otras fracciones minoritarias, pero de gestión crítica. Entre ellas se encuentran los residuos orgánicos (mermas de proceso y subproductos), los residuos asimilables a urbanos (procedentes de las actividades administrativas) y, con especial relevancia legal,

los residuos peligrosos derivados de las operaciones de mantenimiento electromecánico, la manipulación de reactivos químicos en protocolos de limpieza y los análisis del laboratorio de calidad.

Con el objetivo de estructurar el plan de gestión medioambiental de la instalación, la Tabla 10 clasifica las principales corrientes de residuos físicos generados, identificando su origen operativo y definiendo la vía de valorización o disposición final más adecuada según la jerarquía europea de residuos.

Tabla 10. Principales residuos encontrados en una empresa láctea [68]

Grupo		Residuo	Lugar de generación	Destinos más habituales
Residuos orgánicos		Producto no conforme (materia prima, producto semielaborado, producto final)	Proceso	Reciclaje (alimentación animal)
Asimilables a los domésticos		Restos de comida, papel	Oficinas	Compostaje o depósito en vertedero
Envases y embalajes	Vacíos	Film retráctil, palets de madera, sacos de papel. Envases de plástico, vidrio, cartón, papel	Recepción	Reutilización o reciclaje
	Llenos	Envases de plástico, vidrio, cartón, papel	Envasado, Almacenamiento, Devoluciones	Depósito en vertedero o separación de envases-producto y gestión por separado
Residuos de operaciones de mantenimiento		Cables eléctricos, chatarra	Talleres, Áreas de mantenimiento	Reciclaje o depósito en vertedero
Residuos peligrosos		Aceites usados, baterías, envases de productos peligrosos	Laboratorio, Almacén, Taller, Áreas de Limpieza	Transporte, tratamiento y eliminación o depósito en vertedero de peligrosos

A partir de la tipología expuesta, el análisis y desarrollo de la gestión de residuos de la planta se puede explicar en tres bloques principales:

En primer lugar, los residuos orgánicos y asimilables, es decir, las mermas de materia prima, productos semielaborados o productos finales no conformes se generan en la línea de proceso y se suelen destinar a reciclaje, habitualmente como subproductos para la alimentación animal. Esto encaja directamente con la normativa del Listado Europeo de Residuos bajo el código LER 02 05 01, el cual clasifica específicamente a los materiales inadecuados para el consumo o la elaboración, como las mermas de leche cruda. [69]

Por otra parte, para los envases y embalajes es necesario diferenciar dos flujos distintos. La sala de llenado aséptico generará, inevitablemente, taras de producción, bobinas de cartón defectuosas por errores de impresión o impresión de loteado, y empalmes mal sellados entre bobinas, ocasionando envases rotos o defectuosos. En la planta, estos residuos, al vacío y secos, son aislados en contenedores específicos, separados de cualquier residuo húmedo u orgánico para no alterar sus propiedades mecánicas. Se compactarán en balas cúbicas de alta densidad para reducir su volumen para optimizar la logística de transporte. Su destino no es un vertedero de rechazo mixto; se transfieren a gestores y fábricas papeleras autorizadas que operan despulpadoras hidráulicas. [69]

Por último, en cuanto a los residuos peligrosos, generados en las áreas de limpieza, talleres de mantenimiento y laboratorios, se obtienen fracciones de carácter tóxico, tales como aceites usados, baterías y envases de productos químicos peligrosos (como las garrafas de sosa y ácidos empleados en el sistema CIP). Es fundamental recalcar en que estos residuos requieren medidas estrictas de segregación; además, su transporte, tratamiento y eliminación final en vertederos de residuos peligrosos debe realizarse exclusivamente mediante gestores autorizados. [69]

En el marco normativo del Listado Europeo de Residuos (LER), los desechos biológicos y fisicoquímicos generados por este sector se agrupan bajo el epígrafe 02 05 ("Residuos de la industria de productos lácteos"), el cual se subdivide en tres fracciones principales según su origen operativo. En primer lugar, el código 02 05 01 ampara los materiales inadecuados para el consumo o la elaboración, abarcando desde mermas de leche cruda y sueros excedentes hasta los lodos proteicos extraídos durante las purgas de las desnatadoras centrífugas. En segundo lugar, el código 02 05 02 clasifica de forma específica los lodos derivados del tratamiento in situ de los

efluentes líquidos, como las masas coaguladas de grasas saponificadas obtenidas en el sistema DAF de la depuradora industrial (EDARI). Finalmente, el código 02 05 99 actúa como categoría residual para aquellos elementos no especificados anteriormente. [69]

8.3 Gestión de efluentes líquidos y depuración (EDARI)

En la fase de procesado industrial, la naturaleza del impacto ambiental cambia radicalmente. A nivel de planta, las emisiones atmosféricas pasan a ser minoritarias y se limitan principalmente a los gases de combustión de las calderas necesarias para los tratamientos térmicos UHT. Sin embargo, el verdadero reto de la planta recae sobre el elevado consumo hídrico, ya que la industria láctea requiere entre 2 y 5 litros de agua por cada litro de leche procesada. [70]

La industria láctea es altamente intensiva en el uso de recursos hídricos. A diferencia de otros sectores, la mayoría de este efluente no se genera durante la producción, sino durante las labores de limpieza. El causante de más del 90% de la carga orgánica contaminante es el sistema CIP (Cleaning In Place o Limpieza In Situ). Las redes de tuberías, homogeneizadores y placas UHT deben lavarse a diario en circuito cerrado mediante choques químicos y térmicos para evitar la proliferación microbiana y eliminar incrustaciones. [71]

El vertido directo colapsaría las redes de saneamiento municipal. Por ello, la instalación integrará una Estación Depuradora de Aguas Residuales Industriales (EDARI). El núcleo de este tratamiento incluye una balsa de homogeneización para auto-neutralizar los choques de pH (garantizando un rango normativo de 6,0 a 9,5) y un sistema DAF (Flotación por Aire Disuelto). [72] Este sistema está diseñado para separar sólidos coloidales y fluidos inmiscibles, actuando mediante la inyección de microburbujas de aire a alta presión que se adhieren a las partículas contaminantes previamente coaguladas, elevándolas hacia la superficie para ser retiradas mecánicamente en forma de lodo flotante. En el contexto de una industria láctea, el DAF gestiona los efluentes altamente contaminados que se generan tras los lavados químicos diarios de las instalaciones. [73]

El diseño medioambiental de la presente planta se ha fundamentado en el estricto cumplimiento del marco normativo vigente, en particular el Real Decreto Legislativo 1/2016, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Prevención y Control Integrados de la Contaminación Gracias a la selección de gas natural como combustible para las calderas de producción de vapor, el cual carece de azufre e impurezas, se evita la generación de contaminantes atmosféricos severos.

MEMORIA JUSTIFICATIVA

9 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto de ingeniería surge como respuesta a la necesidad de adaptar la industria láctea a los nuevos perfiles nutricionales y exigencias de los consumidores. Para dotar a esta memoria de un rigor técnico y normativo realista, se estableció contacto con la Federación Nacional de Industrias Lácteas (FENIL). Mónica Ullate, experta en Política Alimentaria, Nutrición e Información al Consumidor de dicha entidad, facilitó documentación, incluyendo las directrices oficiales de la AESAN sobre las condiciones de empleo de las menciones "sin lactosa", las cuales han sido fundamentales para definir los parámetros de diseño de esta planta. [74]

El Informe anual del consumo alimentario en España 2024 del MAPA confirma que la dieta mediterránea sigue muy presente y destaca que las ocasiones de consumo de lácteos en los hogares aumentaron un 2,9 % frente al año anterior. La leche sin lactosa tiene una tasa de penetración de casi el 39,5 % en los hogares españoles. Esto significa que prácticamente 4 de cada 10 familias compran este producto de forma regular. El consumo medio se sitúa en unos 8,66 litros por persona y año en España, una cifra que sigue en tendencia ascendente con un 0,7 % de crecimiento anual. [75]

El diseño de la presente planta se justifica como un complejo industrial altamente versátil y escalable. La incorporación de la tecnología aséptica en línea (post-hidrólisis) permite que la instalación no quede inmovilizada como una planta de un solo producto, sino que posea la flexibilidad necesaria para adaptarse a las fluctuaciones del mercado utilizando una línea UHT estándar de alta capacidad.

Otro pilar fundamental que justifica el diseño adoptado para esta planta es su viabilidad operativa y su versatilidad industrial. Tal y como confirmó Alejandro Martínez, de FENIL, la producción de leche líquida sin lactosa no suele llevarse a cabo de forma exclusiva en instalaciones dedicadas únicamente a este producto. [76] Por norma general, la industria opera mediante plantas preparadas de forma integral para el procesamiento y envasado de leche UHT, utilizando estas mismas instalaciones para derivar producciones de leche entera, semidesnatada, desnatada, sin lactosa o enriquecida. Esta diversificación técnica se justifica mediante las estadísticas de consumo del MAPA, las cuales revelan la clara preferencia del consumidor por la variedad semidesnatada (con un consumo global de 1.349 millones de litros anuales), seguida de la leche entera (868,5 millones de litros) y la desnatada (657,6 millones de litros). [77] Para adaptar la producción de la planta a estas cuotas comerciales reales, la ingeniería del proceso integra una separadora centrífuga hermética en caliente, permitiendo estandarizar dinámicamente el contenido de materia grasa de la leche y desviar los excedentes en forma de nata.

A continuación, se presentan los resultados en la Tabla 11 para ofrecer una visión clara de los parámetros de diseño que regirán los balances de materia de la instalación:

Tabla 11. Cuotas de producción y balance de caudales para las distintas líneas de envasado.

Tipo de leche sin lactosa	Cuota de producción (%)	Producción diaria (L/día)	Caudal nominal (L/h)
Leche entera	30	120.000	6.000
Leche semidesnatada	50	200.000	10.000
Leche desnatada	20	80.000	4.000
Total		400.000	20.000

10 BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

En este apartado se procederá al cálculo de los balances de materia y energía de los equipos principales del proceso de obtención de leche UHT sin lactosa, como paso previo fundamental para su dimensionamiento y diseño técnico.

10.1 Balance de Materia

El cálculo del balance de materia se fundamenta en el principio de conservación de materia de Lavoisier, garantizando que todo el flujo másico de entrada equivale exactamente al de salida. Al tratarse de un proceso en régimen estacionario y libre de reacciones químicas, se descarta cualquier término de acumulación. Por ello, en cada equipo de la instalación se ha estructurado un balance parcial por componente. Expresando los caudales másicos de cada corriente a través de sus correspondientes fracciones másicas, se obtiene la siguiente relación:

$$\sum_{j=1}^{n_e} F_{ij} = \sum_{j=1}^{n_e} F_j \cdot x_{ij} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\sum_{k=1}^{n_s} S_{ik} = \sum_{k=1}^{n_s} S_k \cdot x_{ik} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\sum_{j=1}^{n_e} F_j \cdot x_{ij} = \sum_{k=1}^{n_s} S_k \cdot x_{ik} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- x_{ij} es la fracción másica del componente i en la corriente j para todos los números de corrientes n de entrada.
- x_{ik} es la fracción másica del componente i en la corriente k para todos los números de corrientes n de salida.
- F_{ij} es el caudal másico del componente i de la mezcla en la corriente j para todos los números de corrientes n de entrada en kg/h.
- S_{ik} es el caudal másico del componente i de la mezcla de la corriente k para todos los números de corrientes n de salida en kg/h.

Se han incorporado al balance de materia dos consideraciones específicas del proceso productivo de la leche UHT. A continuación, se detallan y explican los pasos matemáticos y conceptuales desarrollados en los códigos de simulación de EES para abordar las tres consideraciones específicas del balance de materia.

En primer lugar, para la estandarización de la grasa, se realiza un balance de materia global y un balance por componentes para separar el exceso de nata (con un 40% de grasa) de la leche cruda, reajustando la composición del plasma lácteo según la línea de leche (entera, semidesnatada o desnatada).

Los parámetros de diseño fundamentales del modelo, que comprenden la caracterización fisicoquímica inicial de la corriente de alimentación y las fracciones másicas objetivo de grasa para cada tipología de producto final, se encuentran sintetizados en la Tabla 12.

Tabla 12. Composición porcentual en peso (% p/p) de los datos de partida y estandarización

i	Componente	Leche cruda (entrada)	Línea 1: Entera (salida)	Línea 2: Semidesnatada (salida)	Línea 3: Desnatada (salida)	Exceso de nata (salida)
1	Agua	87,7				
2	Carbohidratos	4,7				
3	Grasa	3,6	3,5	1,5	0,5	40
4	Proteínas	3,3				
5	Minerales	0,7				

Como se puede observar en la tabla anterior, los datos de partida del proceso establecen la composición de la corriente de entrada, correspondiente a la leche cruda. Durante la etapa de estandarización, esta corriente de entrada se somete a una separación centrífuga de la que se obtienen dos corrientes de salida: por un lado, la corriente de leche estandarizada (cuyo objetivo de grasa variará dependiendo de la línea de producción a la que se destine) y, por otro lado, una corriente de exceso de nata que es retirada del sistema principal.

Dado que en esta operación física el único objetivo es ajustar el contenido de materia grasa de la mezcla, extrayendo una porción rica en lípidos, el resto de los constituyentes lácteos (el agua, los carbohidratos, las proteínas y los minerales) conforman lo que se denomina plasma lácteo.

La base de este cálculo asume que la proporción relativa de estos componentes no grasos se mantiene inalterable entre la corriente de entrada y las corrientes de salida. Por lo tanto, no es necesario fijar datos de partida adicionales para estos componentes en las salidas; sus nuevas fracciones másicas se recalculan aplicando directamente la relación de conservación del plasma lácteo, que rige la concentración por el efecto de la extracción de grasa:

$$x_{i,salida} = x_{i,entrada} \cdot \frac{1-x_{grasa,salida}}{1-x_{grasa,entrada}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- $x_{i,salida}$ es la fracción másica del componente (agua, carbohidratos, proteínas o minerales) en las diferentes corrientes de salida (leche estandarizada o exceso de nata).
- $x_{i,entrada}$ es la fracción másica del componente i en la corriente de entrada (leche cruda).
- $x_{grasa,salida}$ es la fracción másica de grasa exigida como objetivo en las corrientes de salida.
- $x_{grasa,entrada}$ es la fracción másica de grasa presente en la corriente de entrada.

En segundo lugar, el desaireador opera como un sistema de separación en estado estacionario. Aunque internamente se produce una evaporación súbita, el equipo cuenta con un condensador integrado en la cúpula que retorna el vapor condensado a la fase líquida. Por tanto, el balance de materia global asume que la única extracción másica corresponde a los gases incondensables. Dadas las características tecnológicas del equipo seleccionado, el balance por componentes se simplifica drásticamente. Al someter la leche al vacío, una fracción de agua hierve y se evapora, arrastrando consigo los gases disueltos. Sin embargo, esta corriente de vapor choca con el condensador interno, pasando de nuevo a estado líquido y precipitando por gravedad al fondo del recipiente. Como no hay extracción de vapor hacia la bomba de vacío, el contenido de agua de la leche no varía, evitando su concentración indeseada. A efectos prácticos de cálculo para el proceso principal, dado que la masa de los gases disueltos es cuantitativamente insignificante respecto al caudal volumétrico total, se asume que el caudal másico de entrada es prácticamente idéntico al de salida.

Por último, para la inyección aséptica de lactasa, se contempla una adición en continuo de la enzima lactasa a razón de 0,2 g/L, lo cual altera las fracciones másicas de la corriente principal debido al efecto de dilución.

A partir del modelo de Choi y Okos (ver Tabla 24) y evaluando a la temperatura de la corriente de entrada de inyección aséptica, se calcula la densidad individual de cada componente lácteo. Luego, se aplica la ley de las mezclas para obtener la densidad global de la leche en kg/m³.

$$\rho_{mezcla} = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^5 \rho_i(T_j)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dado que la lactasa se añade disuelta en una base líquida, el modelo asume que este nuevo aporte másico incrementa directamente la fracción de agua y base enzimática en la mezcla final, a la vez que genera un efecto de dilución sobre la concentración del resto de los componentes sólidos (carbohidratos, grasa, proteínas y minerales). Las ecuaciones generales que rigen las nuevas fracciones másicas en la corriente de salida son:

- Para el componente base (agua + base enzimática, $i=1$):

$$x_{i,salida} = \frac{m_{entrada} \cdot x_{i,entrada} + m_{lactasa}}{m_{salida}} \quad \text{Ecuación 6}$$

- Para el resto de los componentes ($i \neq 1$):

$$x_{i,salida} = \frac{m_{entrada} \cdot x_{i,entrada}}{m_{salida}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- $x_{i,salida}$ es la nueva fracción másica del componente en la corriente de salida.
- $x_{i,entrada}$ es la fracción másica del componente en la corriente de entrada.

En cuanto a las pérdidas, como se comentó durante la visita a la fábrica de Pedroches, hasta el equipo UHT la merma es prácticamente despreciable. La merma normal en una planta suele rondar el 1% ~~quizá algo más~~, pudiendo llegar hasta el 2%. Por ello, se han considerado pérdidas por mermas en tres etapas críticas. Una merma térmica del 0,1% en la desaireación por el fenómeno de evaporación. Este vapor de agua generado súbitamente es aspirado por la línea de vacío junto con el oxígeno y otros gases volátiles. Otra merma térmica del 1% a la salida de la sección de enfriamiento final, donde se considera que el módulo UHT conlleva una desnaturalización de proteínas del suero, lo que hace que éstas se incrusten en las paredes de los equipos de intercambio de calor tubulares. Esta costra de leche quemada es masa que entra al equipo, pero no sale como producto, sino que termina siendo desechada durante la limpieza CIP. Y una merma mecánica del 0,6% durante la etapa de envasado aséptico por rechazos, limpiezas y retenciones. Las máquinas envasadoras asépticas (como las líneas Tetra Brik) realizan controles de peso, integridad de soldadura y aplicación del tapón. Los primeros envases de un lote o aquellos detectados como defectuosos por los sensores ópticos son descartados.

En las figuras que se presentan a continuación se ilustra el balance de materia de la planta mediante diagramas de bloques correspondientes a cada una de las líneas de producción analizadas. Asimismo, en el Anexo se recoge el balance de materia individualizado para cada variedad específica de leche UHT sin lactosa entera (Figura 25), semidesnatada (Figura 26) y desnatada (Figura 27), proporcionando un desglose exhaustivo de las corrientes de entrada, salidas y las posibles mermas térmicas y mecánicas involucradas en cada caso.

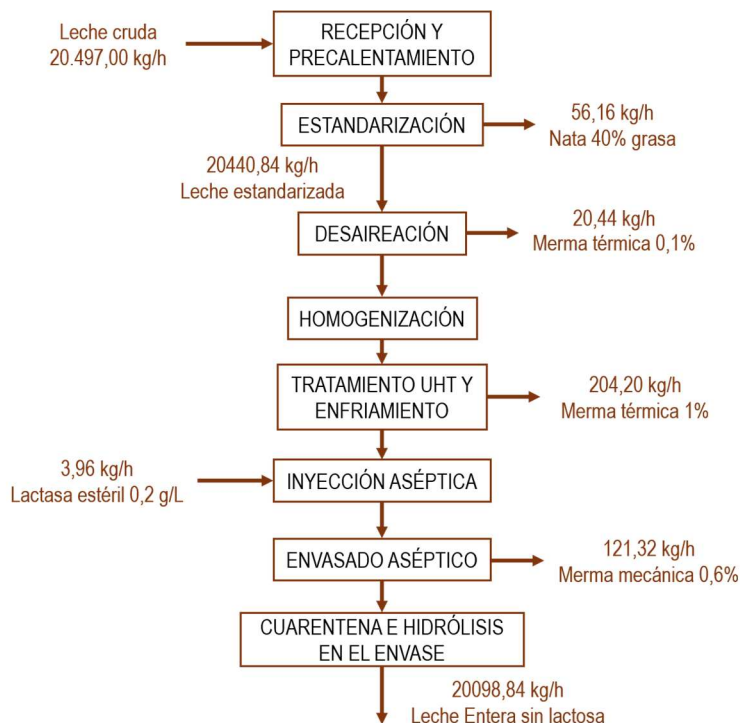


Figura 25. Balance de materia para la producción de leche sin lactosa en la Línea 1

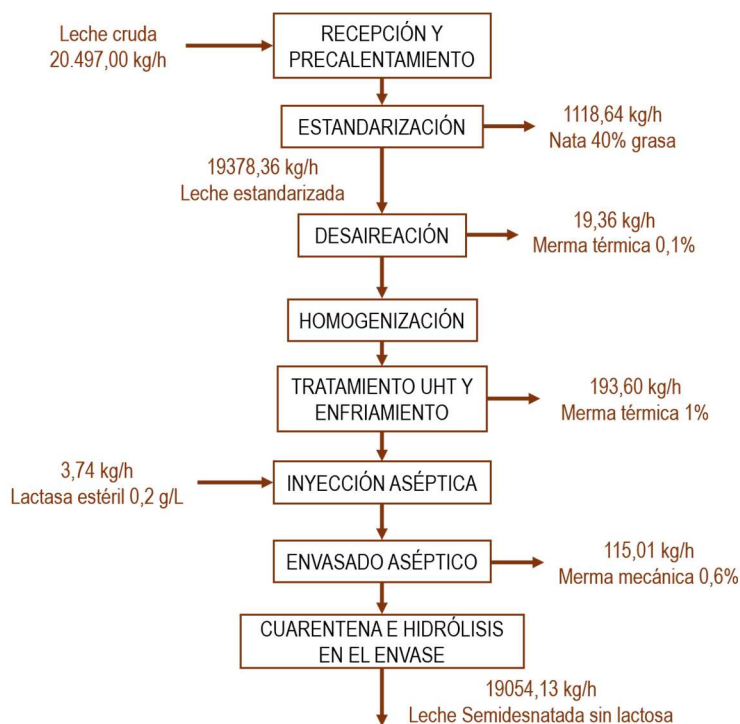


Figura 26. Balance de materia para la producción de leche sin lactosa en la Línea 2

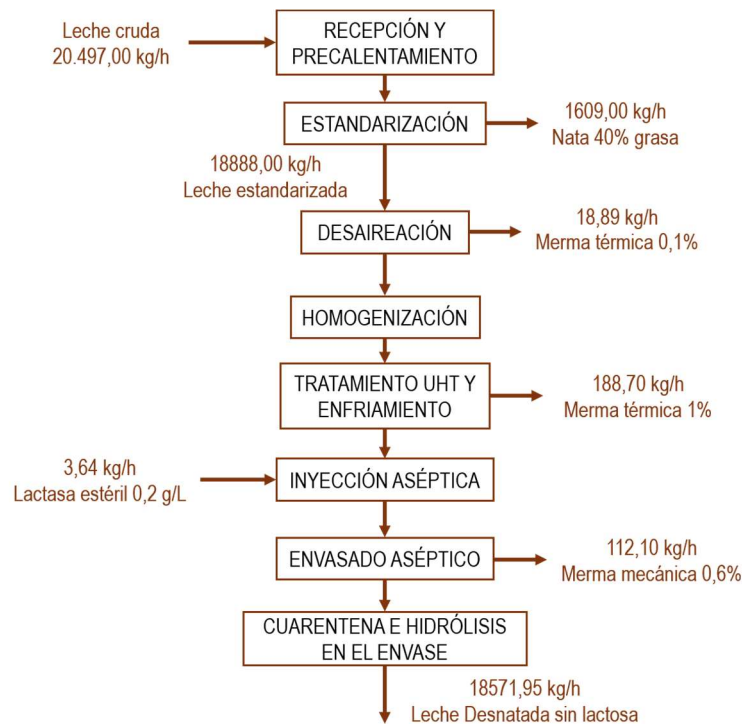


Figura 27. Balance de materia para la producción de leche sin lactosa en la Línea 3

10.2 Balance de Energía

En esta sección se presenta el balance de energía correspondiente a los equipos de la planta, con el objetivo de determinar la potencia necesaria para satisfacer los requerimientos térmicos y mecánicos del proceso productivo, como los intercambiadores (regeneradores, calentadores, enfriadores), el desaireador y el homogeneizador.

En general, la ley de conservación de la energía, según la primera ley de la termodinámica, indica que la cantidad total de energía es constante. Por tanto, el balance de energía, considerando idealidad de mezclado y asumiendo un proceso en estado estacionario sin reacción química, toma la forma.

$$\sum_{j=1}^{n_e} F_j \cdot \left(gz_j + \frac{v_j^2}{2} + u_j + P_j \cdot v_j \right) + Q + W = \sum_{k=1}^{n_s} S_k \cdot \left(gz_k + \frac{v_k^2}{2} + u_k + P_k \cdot v_k \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- gz_j o gz_k es la energía potencial específico de la corriente j o k para todos los números de corrientes de entrada n_e y salida n_s en kJ/kg, con g la aceleración gravitacional en m/s^2 y z_j o z_k la altura en metros a la que se encuentra el punto considerado en el sistema.
- $\frac{v_j^2}{2}$ o $\frac{v_k^2}{2}$ es la energía cinética específica de la corriente j o k .
- u_j o u_k es el trabajo de flujo específico en kJ/kg.
- $P_j \cdot v_j$ o $P_k \cdot v_k$ es el trabajo de flujo específico de la corriente j o k para todos los números de corrientes de entrada n_e y salida n_s en kJ/kg, con P_j o P_k la presión de la corriente j o k en Pascales y v_j o v_k el volumen específico del fluido en m^3/kg .
- Q es el calor cedido o aportado por el entorno a los diferentes equipos en kW.
- W es el trabajo mecánico realizado o aportado al sistema en kW.

En este caso se pueden despreciar las variaciones de energía cinética y energía potencial frente a los valores de energía interna y trabajo de flujo tratado. Además, el sumatorio de estas últimas energías define la entalpía específica (h) en kJ/kg, quedando la ecuación anterior simplificada.

$$h_j = u_j + P_j \cdot v_j \quad \text{Ecuación 9}$$

$$h_k = u_k + P_k \cdot v_k \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\sum_{j=1}^{n_e} F_j \cdot h_j + W + Q = \sum_{k=1}^{n_s} S_k \cdot h_k \quad \text{Ecuación 11}$$

Desde un enfoque termodinámico, la variación de entalpía de una corriente o sistema (omitiendo la dependencia de la presión para simplificar) se puede expresar a presión constante como

$$dh = c_p \cdot dT + \left(v - T \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right) \cdot dP \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- c_p es la capacidad calorífica específica a presión constante en kJ/kgK.

En nuestro caso, la entalpía específica de la mezcla para cada corriente es calculada de la siguiente forma donde ω_{ij} es la fracción másica del componente i en la corriente j , c_{pi} es la capacidad calorífica específica a presión constante del componente i en kJ/kg·K, T_j es la temperatura de la corriente j en °C y, T_{ref} es la temperatura de referencia en °C

$$h_j = \sum_{i=1}^{n_c} \omega_{ij} \cdot c_{pi} \cdot (T_j - T_{ref}) \quad \text{Ecuación 13}$$

$$h_k = \sum_{i=1}^{n_c} \omega_{ik} \cdot c_{pi} \cdot (T_k - T_{ref}) \quad \text{Ecuación 14}$$

Sustituyendo esto en la ecuación general, el balance calorífico de la planta se expresa como:

$$\sum_{j=1}^{n_e} F_j \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_c} \omega_{ij} \cdot c_{pi} \cdot (T_j - T_{ref}) \right) + Q + W = \sum_{k=1}^{n_s} S_k \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_c} \omega_{ik} \cdot c_{pi} \cdot (T_k - T_{ref}) \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

A diferencia de los ingredientes con una capacidad calorífica constante, las propiedades termo físicas de la leche (calor específico c_{pi} , densidad ρ_i , conductividad térmica k_i y viscosidad μ_i) varían significativamente con la temperatura y la composición de la mezcla. Para resolver los balances de energía en el entorno EES, se recurre al modelo empírico de Choi y Okos (ver Tabla 24), el cual utiliza ecuaciones polinómicas dependientes de la temperatura (T) para cada componente principal. [78]

$$c_{p_{mezcla}} = \sum_{i=1}^5 \omega_i \cdot c_{pi}(T_j) \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- ω_i para $i=1, \dots, 5$ son las fracciones másicas de agua, carbohidratos, grasa, proteínas y minerales, respectivamente.
- T_j es la temperatura en la corriente j

Conocidas las composiciones de cada ingrediente y la temperatura de su corriente, se determinan los valores

capacidad calorífica específica. Para poder resolver los balances de energía en el entorno EES, se han establecido y asumido una serie de datos de partida basados en las condiciones operativas típicas de una planta UHT:

- Caudal volumétrico inicial: 20.000 L/h
- Temperatura de entrada de la leche cruda: 6 °C
- Temperaturas de las etapas de tratamiento térmico UHT: Salida de la primera regeneración a 95 °C, salida de la segunda regeneración a 121 °C, calentamiento final de esterilización a 139 °C, enfriamiento en regeneración a 113 °C y posteriormente a 86 °C (o 83 °C según línea), temperatura de enfriamiento final a 25 °C
- El equipo opera a una presión relativa de -0,8 bar (0,2 bar absolutos). Por principios de equilibrio termodinámico, la leche sufre una vaporización instantánea hasta alcanzar la temperatura de saturación correspondiente a dicha presión de vacío.
- Durante la homogeneización, la energía mecánica proporcionada por la bomba se disipa en forma de fricción y calor en la válvula de homogeneización. El incremento de temperatura de la leche y el calor generado se calculan en función de la caída de presión, la densidad del fluido a esa temperatura y las eficiencias mecánica 85% y eléctrica de 95%.
- Agua sobrecalentada (Calentamiento final): Temperatura de entrada de 145 °C (ligeramente superior a la de la leche para evitar quemarla) y temperatura de retorno de 124 °C, presurizada a 500 kPa para evitar su ebullición.
- Agua fría (Enfriamiento final): Temperatura de entrada de 10 °C y de salida de 20 °C.

10.2.1 Homogeneizador

Desde el punto de vista del balance de energía, el trabajo mecánico suministrado por los pistones del equipo se transforma casi en su totalidad en calor debido a la fricción viscosa, la turbulencia y las fuerzas de cizalla extremas que experimenta el fluido. Por lo tanto, es necesario cuantificar la potencia térmica generada y su impacto en la temperatura de la corriente. El modelo computacional evalúa el calor generado a través de la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{\text{homo}} = \frac{\dot{m}_4 \cdot 100 \cdot (P_{4,c} - P_4)}{\rho_4 \cdot 3600 \cdot \eta_{\text{pump}} \cdot \eta_{\text{el}}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- $\dot{Q}_{\text{homo}}$ es la potencia térmica disipada en el fluido, expresada en kW (o kJ/s).
- $\dot{m}_4$ es el caudal másico de la leche a la entrada del equipo, expresado en kg/h.
- $(P_{4,c} - P_4)$ es el incremento de presión provisto por la bomba del homogeneizador, expresado en bar. En el modelo, $P_{4,c}$ representa la presión de homogeneización (200 bar) y P_4 la presión de alimentación.
- Factor 100 es el factor de conversión unitaria de la presión de bares a kilopascales (kPa).
- ρ_4 es la densidad de la leche a la temperatura y composición de entrada, expresada en kg/m³.
- Factor 3600 es el factor de conversión temporal para pasar el caudal de horas a segundos.
- η_{pump} es la eficiencia mecánica e hidráulica de la bomba, fijada en 0,85 (85%). Compensa las pérdidas por fricción en las partes móviles del equipo.
- η_{el} es la eficiencia del motor eléctrico, fijada en 0,95 (95%).

Como consecuencia directa de esta disipación energética, la leche experimenta un aumento de temperatura al atravesar el cabezal homogeneizador. En la industria láctea y en el modelo evaluado, este incremento se estima mediante una correlación empírica directa con la caída de presión:

$$T_6 = T_4 + \frac{P_{4,c} - P_6}{22} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

- T_6 es la temperatura final de la leche a la salida del homogeneizador, expresada en °C.
- T_4 es la temperatura de la leche a la entrada, expresada en °C.
- $P_{4,c} - P_6$ es el salto de presión total desde la compresión hasta la descarga atmosférica o línea siguiente, expresado en bar.
- Constante 22: Es un coeficiente térmico propio del proceso lácteo que indica que la temperatura de la leche aumenta aproximadamente 1 °C por cada 22 bar de caída de presión en la válvula de homogeneización. [6]

10.2.2 Intercambiadores de calor

Se han distinguido entre el intercambiador de calor de placas como pasteurizador HTST con una eficiencia de 91%, mientras que, para los intercambiadores tubulares del módulo UHT uno de 85% sustentado en los límites operativos y termodinámicos.

Desde el punto de vista de la resolución del balance de energía en el entorno EES, el modelado de los intercambiadores se ha dividido según la naturaleza de la transferencia térmica en dos bloques fundamentales

La resolución de este equipo presenta una particularidad en el balance. Dado que el dato de partida de la planta es un caudal volumétrico de leche cruda, el modelo evalúa en primer lugar la densidad global de la mezcla a la temperatura exacta de entrada (6 °C) empleando las ecuaciones termo físicas de Choi y Okos (ver Tabla 24). Esto permite determinar el caudal másico inicial ($\dot{m}_{leche\ cruda}$) con alta precisión. A continuación, se calcula la potencia térmica total teórica (Q_{HTST}) necesaria para elevar la leche desde los 6 °C hasta la temperatura de pasteurización, empleando el calor específico promedio del tramo:

$$Q_{HTST} = \frac{\dot{m}_{leche\ cruda}}{3600} \cdot \left(\frac{c_{p_{entrada}} + c_{p_{salida}}}{2} \right) \cdot (T_{pasteurización} - T_{entrada}) \quad \text{Ecuación 19}$$

Debido a la alta eficiencia térmica de este equipo, el balance asume que un 91% de esta demanda energética se satisface de forma interna mediante autor regeneración con la propia leche ya pasteurizada:

$$Q_{regen,HTST} = Q_{HTST} \cdot \eta_{regen} \quad \text{Ecuación 20}$$

Por tanto, el calor real que exige el consumo de servicios auxiliares (agua caliente) se reduce únicamente a la fracción restante no recuperada:

$$Q_{calen,HTST} = Q_{HTST} \cdot (1 - \eta_{regen}) \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde η_{regen} toma el valor de 0,91.

Para las secciones de regeneración producto a producto como en el E-102 y E-103, el núcleo de la eficiencia del proceso radica en el aprovechamiento de la energía interna de la propia corriente. La leche ya esterilizada (fluido caliente) cede su calor a la leche cruda que entra al sistema (fluido frío). El balance de energía en estos tramos se resuelve aislando el calor intercambiado (Q_{regen}) mediante la variación de entalpía, evaluando el calor específico promedio de la mezcla láctea entre la temperatura de entrada y salida:

$$Q_{regen} = \frac{\dot{m}_{leche}}{3600} \cdot \left(\frac{c_{p_{entrada}} + c_{p_{salida}}}{2} \right) \cdot (T_{salida} - T_{entrada}) \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

- Q_{regen} es la potencia térmica o flujo de calor transferido en la sección de regeneración, expresado en kW o kJ/s.

- $\dot{m}_{leche}$ es el caudal másico constante de leche estandarizada que atraviesa el intercambiador tubular, expresado en kg/h.
- $\left(\frac{c_{p_{entrada}} + c_{p_{salida}}}{2}\right)$ es el calor específico promedio de las capacidades caloríficas de la leche a las temperaturas exactas de entrada y salida de ese tramo. Se calculan internamente con el modelo polinómico de Choi y Okos (ver Tabla 24) según la composición específica de cada línea. Se expresan en kJ/(kg·°C).
- $(T_{salida} - T_{entrada})$ es el salto térmico que experimenta la leche en ese tramo de regeneración, expresado en °C. Se expresan los valores de temperaturas en cada corriente de entrada y salida en la siguiente Tabla 13:

Tabla 13. Perfil de temperaturas de las corrientes en los intercambiadores tubulares de regeneración (E-102 y E-103)

	Lado	Corriente de entrada	Temperatura (°C)	Corriente de salida	Temperatura (°C)
E-102	Frío	18	69,1	19	95
	Caliente	26	113	27	86
E-103	Frío	20	95	21	121
	Caliente	25	139	26	113

Para las secciones de calentamiento y enfriamiento final, se utilizan fluidos de servicio.

En el calentador final UHT, se utiliza agua sobrecalentada presurizada (a unos 500 kPa para evitar su ebullición) que entra a 145 °C. El balance de energía iguala el calor absorbido por la leche (para pasar de 121 °C a 139 °C) con el calor cedido por el agua, permitiendo despejar como incógnita principal el caudal másico de agua caliente requerido para la operación:

$$\dot{m}_{servicio} = \frac{Q_{calentamiento}}{c_{p_{servicio}} \cdot |T_{salida} - T_{entrada}|} \quad \text{Ecuación 23}$$

Para garantizar la máxima precisión termodinámica, el calor específico del fluido auxiliar ($c_{p_{servicio}}$) se ha evaluado utilizando las librerías termodinámicas del entorno EES, determinando su valor a la temperatura media del fluido $\left(\frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2}\right)$ y a la presión de operación del circuito (a 500 kPa en el caso del agua sobrecalentada para evitar el cambio de fase).

En el enfriador final, se utiliza agua fría de torre. Dado que se asume una pérdida de masa progresiva (mermas térmicas del 1%) a lo largo de este último tramo, el cálculo del calor cedido por la leche (Q_{regen}) emplea un caudal másico promedio entre la entrada y la salida del equipo. La energía extraída determina de nuevo la demanda de caudal de agua refrigerante.

$$\dot{m}_{servicio} = \frac{Q_{enfriamiento}}{c_{p_{servicio}} \cdot |T_{salida} - T_{entrada}|} \quad \text{Ecuación 24}$$

Se ha realizado el mismo planteamiento que se ha utilizado anteriormente, con el calor específico del fluido auxiliar utilizando las librerías termodinámicas del entorno EES, determinando su valor a la temperatura media del fluido (es decir, 15 °C) y a la presión de operación estándar del circuito (100 kPa).

A continuación, se presentan los perfiles de temperatura (ver Tabla 14) para los equipos térmicos que utilizan servicios auxiliares, el calentamiento UHT (que aporta el calor necesario para la esterilización) y el enfriamiento final (que retira el calor para llegar a la temperatura de dosificación de lactasa y envasado).

Tabla 14. Perfil de temperaturas en las secciones de calentamiento y enfriamiento final con fluidos de servicio

	Lado	Fluido	Corriente de entrada	Temperatura (°C)	Corriente de salida	Temperatura (°C)
E-104	Frío	Leche	21	121	24	139
	Caliente	Agua sobrecalentada	22	145	23	124
E-105	Caliente	Leche	27	86	31	25
	Frío	Agua fría	28	10	29	20

10.2.3 Inyección Aséptica de Lactasa

A diferencia del resto de operaciones físicas de la planta, la inyección aséptica de la enzima lactasa desencadena un proceso reactivo (la hidrólisis de la lactosa). Desde un punto de vista termodinámico estricto, el procedimiento para la resolución del balance de energía de este equipo requiere la aplicación del método del grado de avance y del calor de reacción:

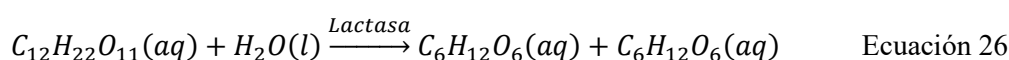
La ecuación general de balance de energía para procesos reactivos en sistemas continuos establece que la variación de entalpía total debe contabilizar tanto el calor sensible de las corrientes de entrada y salida, como la energía consumida o generada por la propia reacción química:

$$\Delta \dot{H} = \xi \cdot \Delta H^o_r + \sum_{salida} \dot{n}_i \cdot \bar{h}_i - \sum_{entrada} \dot{n}_i \cdot \bar{h}_i \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde:

- ξ es el grado de conversión de avance de la reacción.
- ΔH^o_r es el calor de reacción (la hidrólisis de la lactosa) expresado en kJ/mol. Es la diferencia de entalpías entre productos y reactivos. Si el sistema operase de forma adiabática (sin intercambio térmico con el exterior), requeriría una variación en la energía de la reacción, alterando su temperatura de salida.

Sin embargo, en el modelo termodinámico de la planta, se ha asumido que la etapa de inyección aséptica de lactasa y la consecuente reacción química de hidrólisis operan bajo condiciones isotermas. Esta hipótesis se fundamenta en la naturaleza termodinámica de la ruptura del disacárido.



Según las determinaciones micro calorimétricas de referencia desarrolladas por Goldberg et al., la entalpía estándar de la hidrólisis de la lactosa es muy baja ($\Delta H^o_r = 0,44 \text{ kJ/mol}$) [79]. Esto se debe a que, al romper el enlace de la lactosa (proceso endotérmico) al mismo tiempo, al romperse la molécula de agua, se forma un nuevo grupo hidroxilo. El tipo de enlace que se rompe son energéticamente muy similares a los enlaces que se forman. El balance neto de energía de energía entre los enlaces de los productos y los reactivos es casi simétrico, lo que resulta en un intercambio de calor mínimo.

Para validar analíticamente esta asunción, se procede a calcular el gradiente térmico teórico máximo (ΔT) que experimentaría la corriente principal si la hidrólisis se desarrollase en condiciones estrictamente adiabáticas. Tomando como base de cálculo 1 kg de leche estándar, el desarrollo matemático es el siguiente:

Sabiendo que la lactosa representa la mayoría (o totalidad) de los carbohidratos en la leche, tiene una fracción másica de 4,7%, es decir, 0,047 kg de lactosa. Utilizando la masa molar del disacárido lactosa, 342,3 g/mol, los moles de lactosa ($n_{lactosa}$) correspondientes son 0,1373 mol. Para calcular la energía neta requerida para hidrolizar toda la lactosa presente en un kilogramo de leche, se aplica la fórmula:

$$Q_{rxn} = n_{lactosa} \cdot \Delta H^o_r \quad \text{Ecuación 28}$$

A partir de esta cantidad de energía, se despeja la variación de temperatura mediante la ecuación calorimétrica:

$$\Delta T = \frac{-Q_{rxn}}{m_{mezcla} \cdot c_{p_{mezcla}}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Sabiendo que el valor del calor específico para la leche entera estandarizada está sobre los 3,9 kJ/kg·°C, el valor de la variación de temperatura es de un descenso de 0,015 °C en la corriente de proceso. Puesto que este orden de magnitud es significativamente inferior al margen de error e incertidumbre de cualquier instrumentación térmica industrial y carece de impacto termodinámico en las etapas posteriores de envasado, se concluye que el término de generación/consumo por reacción es despreciable. Esto valida el modelado isoterma de la operación y simplifica de forma justificada su resolución en el entorno de simulación EES.

Es en el Anexo B donde se recopilan los resultados de este balance junto con el de materia para cada línea de producción (entera, semidesnatada y desnatada), incluyendo todos los valores obtenidos a partir de los cálculos realizados.

11 DIMENSIONADO DE EQUIPOS

En este apartado, se abordará el diseño de los equipos y sistemas de transporte necesarios dentro de la planta. Las hojas de especificaciones técnicas de los equipos seleccionados se encuentran recogidas en el Anexo C.

11.1 Silos de almacenamiento con agitador

Se va a diseñar un conjunto de silos de base circular destinados al almacenamiento de leche cruda. El diseño toma como referencia la capacidad de almacenamiento por silo, con una densidad a una temperatura determinada en kg/m³. Con la masa (m) en kg y la densidad (ρ), se puede calcular el volumen (V) en m³ que ocupará el material dentro del silo:

$$V = \frac{m}{\rho(T)} \quad \text{Ecuación 30}$$

Dado que el silo tendrá una base circular, el volumen útil puede expresarse geométricamente como:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \quad \text{Ecuación 31}$$

donde D es el diámetro del tanque y H es la altura del silo. A partir del volumen calculado y una vez fijado el valor del lado de la base, se podrá despejar la altura necesaria para cumplir con el requerimiento de capacidad de almacenamiento.

Cabe destacar el diseño del serpentín interno del tanque, para ello se utiliza el método F-DTLM, este plantea el calor que se transfiere entre los fluidos del sistema y del cuál se obtiene el área del intercambiador en cuestión. Este método se define de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A_{req} = \frac{Q}{U \cdot F \cdot DTLM} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

- Q es el calor que se transfiere entre los fluidos del sistema en kW.
- U es el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador de calor en considerando 400 W/m²·K
- A_{req} el área requerida del intercambiador en cuestión (serpentín) en m².
- F es el factor de corrección adimensional con valor 1 debido a que el intercambiador opera en flujo contracorriente ideal.
- $DTLM$ es la diferencia de temperatura media logarítmica en K que se determina con las siguientes expresiones:

$$DTLM = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$\Delta T_1 = T_{\text{fluido caliente, entrada}} - T_{\text{fluido frío, salida}} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$\Delta T_2 = T_{\text{fluido caliente, salida}} - T_{\text{fluido frío, entrada}} \quad \text{Ecuación 35}$$

Conociendo el área superficial requerida para la transferencia térmica, se puede determinar la longitud del tubo que conforma el serpentín, dado un diámetro específico (D) en metros. Para un tubo de diámetro interior de (D) 48,5 mm, la longitud (L) en metros necesaria se calcula con la siguiente expresión:

$$L = \frac{A_{ext}}{\pi \cdot D} \quad \text{Ecuación 36}$$

La capacidad de almacenamiento de materias primas, tanto en los tanques como en los silos, se ha dimensionado para garantizar la continuidad operativa conforme a los requerimientos del proceso productivo. El almacenamiento está diseñado para cubrir la demanda de 24 horas de operación continua.

Para la elección del agitador destinado al silo de almacenamiento de leche cruda a bajas temperaturas, se conoce que habitualmente está montado en el eje horizontal. No obstante, para nuestros cálculos asumiremos una disposición en eje vertical con placas deflectoras (o en eje vertical descentrado). Se utiliza un agitador de hélices de 3 palas sin placas deflectoras. La velocidad de giro considerada nos asegura una agitación suave para no romper las estructuras de la leche ni airear el producto [81]. Se empleará la curva de Número de Potencia (N_p) específica para agitadores de entrada lateral, calculando previamente el Número de Reynolds con la densidad y viscosidad de la leche a 6 °C para confirmar el régimen de flujo. La potencia del motor se calcula siguiendo la expresión:

$$P = N_p \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D_a^5 \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

- P es la potencia (energía) requerida para el motor del agitador, medida en vatios (W).
- N_p es el Número de Potencia (que se asume constante verificando previamente un régimen turbulento mediante el Número de Reynolds) cuyo valor es escogido de la Tabla 25 del Anexo C (Nº 21).
- ρ es la densidad del fluido en kg/m³.
- n es la velocidad de giro del agitador, suponiendo un valor de 0,5 rev/s.
- D_a es el diámetro del agitador en m.

11.2 Separador centrífugo (desnatadora)

La clarificación y desnatado de la leche se fundamentan en la separación mecánica de fases por diferencia de densidad bajo un campo centrífugo. Para dimensionar este equipo, se aplicará la Teoría Sigma (Σ), la cual permite comparar el rendimiento de centrífugas de sedimentación y escalar su capacidad de clarificación. Utilizando la ley de Stokes para el movimiento de la partícula en un campo gravitatorio:

$$u_g = \frac{\Delta \rho \cdot d_s^2 \cdot g}{18\mu} \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

- $\Delta\rho$ diferencia de densidades entre la fase continua (leche desnatada) y la fase dispersa (glóbulo graso) en kg/m^3 .
 - d_s es el diámetro de corte del glóbulo graso de $2,0 \cdot 10^{-6}$ m, que garantiza la separación de la mayor parte de la grasa.
 - g es la constante de gravedad, $9,81 \text{ m/s}^2$.
- μ es la viscosidad dinámica de la leche expresado en $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

El valor Sigma (Σ) define el área de sedimentación equivalente requerida para separar el caudal nominal (Q) expresado en m^3/s , considerando el factor de eficiencia (e_{ff}) de la máquina de acuerdo con la Tabla 26 del manual de referencia. [82] La ecuación característica para la capacidad de separación es:

$$\Sigma = \frac{Q}{2 \cdot u_g \cdot e_{ff}} \quad \text{Ecuación 39}$$

Una vez conocido el valor Sigma requerido en m^2 , se selecciona el equipo comercial adecuado consultando los datos de rendimiento en los catálogos de los fabricantes.

11.3 Desaireador

El dimensionado está condicionado por dos criterios hidráulicos: el tiempo de residencia del líquido en la base y el límite de arrastre de gotas en la fase gaseosa (Ecuación de Souders-Brown). Al evaluar el criterio de arrastre, dado que la fracción másica de gases incondensables extraída es inferior al 0,01 y el vapor generado se condensa internamente, el caudal de gas ascendente es despreciable, resultando en un requerimiento de área transversal prácticamente nulo. Por consiguiente, el diámetro del equipo no está gobernado por la velocidad del vapor, sino que viene estrictamente determinado por el volumen necesario para garantizar el tiempo de residencia seguro de la fase líquida en el fondo del tanque.

Se define un tiempo de residencia (t_r) de 1,5 minutos (0,025 h), estandarizado en la industria láctea para lazos de control automático. Partiendo de las condiciones operativas del balance de materia y energía del caudal másico y densidad de la mezcla, el volumen útil (V_L) ocupado por la fase líquida se calcula mediante:

$$V_L = \frac{\dot{m} \cdot t_r}{\rho_{mezcla}} \quad \text{Ecuación 40}$$

Para permitir el correcto desprendimiento de los gases y albergar el condensador interno en la cúpula, se requiere un espacio de cabeza libre. Adoptando un factor de llenado ($f_{llenado}$) del 50%, el volumen teórico total del recipiente resulta:

$$V_t = \frac{V_L}{f_{llenado}} \quad \text{Ecuación 41}$$

En función de la presión de operación que aparece en la Tabla 15 del manual de referencia, se adopta habitualmente una relación entre la altura cilíndrica (H) y el diámetro (D) de 3 para favorecer la separación gravitacional.

Tabla 15. Parámetros de operación y características de diseño del equipo [82]

Rango de presiones de trabajo	Relación H/D
0-20	3
20-35	4
>20	5

Sustituyendo esta relación geométrica en la ecuación del volumen de un cilindro, el diámetro mínimo (D_{min}) requerido se expresa como:

$$D_{min} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_t}{3\pi}}$$

Ecuación 42

11.4 Homogeneizador

El análisis de los requerimientos energéticos y el incremento térmico derivado del trabajo mecánico del homogeneizador ya han sido desarrollados y cuantificados en el Capítulo “” (Balances de Materia y Energía). Por consiguiente, el dimensionado de este equipo en el presente apartado no se centrará en el cálculo de potencia teórica, sino en la especificación de sus parámetros fluido-mecánicos críticos: el caudal volumétrico de diseño y la presión de operación. Estos son los parámetros requeridos para la selección del modelo comercial adecuado que garantice la disrupción de la emulsión láctea bajo las condiciones de planta.

11.5 Tubos de mantenimiento o de retención

La longitud (L) adecuada del tubo para el tiempo de retención (HT) en segundos requerido se puede calcular cuando se conocen el caudal volumétrico (Q) y el diámetro del tubo de retención (D). Como el perfil de velocidad en el tubo de retención no es uniforme, algunas moléculas de leche se moverán más rápido que el promedio. Para asegurar que incluso la molécula más rápida se pasteurice adecuadamente, debe utilizarse un factor de eficiencia (η) establecido de 0,85.

Se calcula el volumen (V) de leche en litros correspondiente a un caudal y un tiempo de retención determinado:

$$V = \frac{Q \cdot HT}{3600 \cdot \eta}$$

Ecuación 43

Para un tubo de diámetro interior de (D) 48,5 mm, la longitud (L_{min}) en metros necesaria se calcula con la siguiente expresión:

$$L_{min} = \frac{V \cdot 4}{\pi \cdot D^2}$$

Ecuación 44

11.6 Equipos de intercambiador de calor

En este apartado se expone el dimensionamiento térmico y geométrico de los equipos de transferencia de calor empleados en la planta. A continuación, se detalla la metodología de cálculo para las dos tecnologías implementadas: intercambiadores de placas y tubulares. En ambos casos, el diseño se fundamenta en el método F-DTLM, la evaluación de las propiedades termo físicas de la leche mediante el modelo de Choi y Okos (ver Tabla 24), y el uso de correlaciones empíricas para determinar el área de intercambio y la configuración comercial óptima de cada equipo.

11.6.1 Intercambiador De Placas

El equipo E-101 opera como un pasteurizador HTST de placas. Su objetivo es elevar la temperatura de la leche cruda desde 6 °C ($T_{c,in}$) hasta la temperatura de pasteurización 72 °C ($T_{c,pasteuriza}$). Al igual que para el balance de materia y energía, las propiedades termo físicas de la leche se evalúan empleando el modelo de Choi y Okos (ver Tabla 24) en base a la composición másica del producto.

Para optimizar la eficiencia energética y la integridad del producto, el proceso se ha segmentado en dos etapas críticas: regeneración y calentamiento final. La sección de regeneración, la leche cruda (corriente fría)

intercambia calor con la leche pasteurizada (corriente caliente) en un régimen de contracorriente, operando con una eficiencia (ϵ) del 91%. La ecuación utilizada para determinar la temperatura de salida de la sección de regeneración (T_{c,reg_out}) es:

$$T_{c,reg_out} = T_{c,in} + \epsilon \cdot (T_{c,pasteuriza} - T_{c,in}) \quad \text{Ecuación 45}$$

Posteriormente, en la sección de calentamiento final, se ha establecido un delta de temperatura de aproximación ($\Delta T_{approac}$) de 3 °C entre el agua caliente de servicio y la temperatura objetivo de pasteurización (72 °C). Al mantener esta diferencia de temperatura reducida, se garantiza que la temperatura de la pared de la placa nunca exceda el umbral crítico de quemado de la leche, preservando la calidad organoléptica del producto.

A partir de las mismas ecuaciones que se aplicaron para los silos de almacenamiento de método de F-DTLM, se asumen unos valores del coeficiente global de transferencia de calor (U) son, en regeneración de 3,8 kW/m²·K y en calentamiento de 4,5 kW/m²·K. Esta diferencia se ha tomado por la mayor turbulencia que hay en la sección de calentamiento. Finalmente, el área total de intercambio sumando ambas secciones, regeneración (A_{regen}) y calentamiento (A_{heat}), se obtiene:

$$A_{total} = A_{regen} + A_{heat} \quad \text{Ecuación 46}$$

Entonces, para un área de una placa (A_{placa}) de 0,62 m²/placa de Alfa Laval [83], se define el número de placas activas:

$$N_{placas,act} = \frac{A_{total}}{A_{placa}} \quad \text{Ecuación 47}$$

Sin embargo, para el dimensionado físico del equipo comercial, se debe considerar la arquitectura de ensamblaje. Debido a exigencias de estanqueidad, es necesaria la inclusión de placas ciegas (placas de acero inoxidable sin puertos de flujo) que actúan como placas terminales y de conexión. Su función es evitar fugas al exterior y aislar las distintas secciones del bastidor para impedir la contaminación cruzada entre los fluidos. Al contar con dos secciones ($N_{secciones}$), se instalan 2 placas ciegas por sección. Como estas placas no participan en el intercambio de calor efectivo, se suman de forma independiente para obtener el número de placas totales del equipo:

$$N_{placas,ciegas} = 2 \cdot N_{secciones} \quad \text{Ecuación 48}$$

$$N_{placas,total} = N_{placas,act} + N_{placas,ciegas} \quad \text{Ecuación 49}$$

11.6.2 Intercambiador Tubular

El equipo E-102 consiste en un intercambiador tubular de regeneración que opera en configuración de contracorriente. Su función es precalentar la leche fría (de 69 °C a 95 °C) aprovechando el calor sensible cedido por la leche caliente que sale del tratamiento térmico (que se enfría de 108,6 °C a 78,33 °C).

En el procesamiento térmico de fluidos alimentarios, es crítico mantener una velocidad que asegure un régimen turbulento para maximizar el coeficiente global de transferencia y minimizar el ensuciamiento, pero sin alcanzar niveles que disparen la pérdida de carga por bombeo. Por ello, se han establecido unos límites entre 1,5 y 4 m/s por dentro de los tubos y entre 0,3 y 2 m/s por fuera de los tubos.

Por ello, la geometría de cada equipo se definió mediante un análisis paramétrico iterativo. Variando el número de tubos interiores, se evaluó el impacto directo sobre las áreas de paso libre y, consecuentemente, sobre las velocidades resultantes tanto en el interior de los tubos como en la carcasa exterior. Tras evaluar los distintos

escenarios, para cada intercambiador se seleccionó la configuración de tubos óptima.

Las propiedades termo físicas de la leche (conductividad térmica, densidad y calor específico) se han evaluado punto a punto en las cuatro temperaturas clave del intercambiador mediante el modelo matemático de Choi y Okos (ver Tabla 24) como se hizo para el balance de energía. Asimismo, la viscosidad (μ) aparente se ha calculado mediante la correlación de Bakshi y D.E. Smith, dependiente de la temperatura y del porcentaje de materia grasa (x_{grasa}):

$$\mu = e^{\left(\frac{2721,5}{T+273,15} + 0,1 \cdot x_{grasa} - 15,808\right)} \quad \text{Ecuación 50}$$

Previamente se calculó en el balance de energía la potencia térmica a partir del caudal másico de leche, su calor específico a sus respectivas temperaturas medias y el salto térmico. Como se explicó para el serpentín del silo de almacenamiento, se ha aplicado el método F-DTLM.

Para poder obtener el área de intercambio habría que calcular previamente el valor del coeficiente global de transferencia de calor (U) referido al área exterior de los tubos interiores. Se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{D_{ext}}{D_{int}} \cdot \left(\frac{1}{h_{int}} + R_{f,int} \right) + \frac{D_{ext}}{2 \cdot k} \cdot \ln \left(\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right) + \frac{1}{h_{ext}} + R_{f,ext} \quad \text{Ecuación 51}$$

Donde:

- h_{int} y h_{ext} son los coeficientes de película del fluido que va por los tubos y del que va por la carcasa en $W/m^2 \cdot K$.
- D_{int} y D_{ext} son los diámetro interior y exterior de los tubos de leche de película del fluido que va por los tubos (h_i) y del que va por la carcasa (h_e) en m.
- $R_{f,int}$ y $R_{f,ext}$ son el factor de ensuciamiento del fluido que va por los tubos y del que va por la carcasa en $m^2 \cdot K/W$. Se asume un ensuciamiento del fluido caliente de $0,0002 m^2 \cdot K/W$ y del fluido frío $0,0001 m^2 \cdot K/W$.
- k es la conductividad de la pared del tubo (Acero Inoxidable AISI 316L) de $15 W/m \cdot K$.

El coeficiente de película, tanto el interno como el externo, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad \text{Ecuación 52}$$

Para calcular el número adimensional Nu son necesarias una serie de correlaciones. A la hora de elegir la correlación adecuada hay que tener en cuenta varios aspectos como el régimen de flujo con el que circula el fluido y la geometría de la superficie con la que está en contacto. El número de Nusselt es función de dos números adimensionales: el número de Reynolds (Re) que indica el régimen en el que circula el fluido y el número de Prandtl (Pr) que relaciona la difusión térmica y la difusión de cantidad de movimiento. Estos números se definen de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Ecuación 53}$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad \text{Ecuación 54}$$

La correlación de Dittus-Boelter para el Número de Nusselt. La fórmula cambia ligeramente su exponente según si el fluido se está calentando o enfriando [84] :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad \text{Ecuación 55}$$

Se ha determinado la longitud total necesaria, a partir de un número de tubos (N_{tubos}) siguiendo la expresión:

$$L_{total} = \frac{A_{req}}{N_{tubos} \cdot \pi \cdot D_{ext}} \quad \text{Ecuación 56}$$

Como los módulos industriales de Tetra Pak miden 6 metros, simplemente se divide la longitud total entre 6 para saber cuántos módulos de carcasa y tubos hay que comprar y conectar en serie.

$$N_{módulos} = \frac{L_{total}}{L_{módulo}} \quad \text{Ecuación 57}$$

Esta misma metodología se ha extrapolado de manera análoga al resto de intercambiadores tubulares que componen la sección UHT de la planta. Asimismo, se ha empleado este algoritmo para el dimensionamiento de las etapas térmicas extremas: el calentador final UHT, encargado de elevar la temperatura de la leche hasta los 139 °C utilizando agua sobrecalentada, y el enfriador final, que reduce la temperatura del producto hasta los 25 °C mediante agua fría de servicio. La única variación metodológica en estos dos últimos equipos radica en la inclusión de las propiedades específicas del agua (fluido de servicio) evaluadas a su correspondiente presión y temperatura media de operación. Se debe tomar en cuenta que, en las etapas de calentamiento y enfriamiento, se hace pasar el producto de leche siempre por el interior de los tubos por diseños sanitarios.

11.7 Envasado

A diferencia del resto de operaciones unitarias de la planta, el dimensionado de la máquina de llenado aséptico no se rige por ecuaciones de transferencia de materia o energía, sino por la capacidad volumétrica de envasado.

Para un caudal volumétrico (Q) y considerando que el producto final se distribuirá en un formato familiar de brik de 1 Litro (V_u), la capacidad de envasado requerida, expresado en envases/h, se calcula mediante la siguiente relación directa:

$$Capacidad \left(\frac{\text{envases}}{h} \right) = \frac{Q}{V_u} \quad \text{Ecuación 58}$$

11.8 Bombas

Dado que todas las bombas del proceso son centrífugas y su función es impulsar fluidos, el procedimiento de diseño es común para todas ellas. Para el diseño de las bombas, se procederá al cálculo de la potencia requerida tal y como indica la siguiente expresión:

$$P = \frac{\dot{m} \cdot g \cdot H_b}{\eta} \quad \text{Ecuación 59}$$

Donde:

- P es la potencia eléctrica real suministrada al motor de la bomba en W.

- $\dot{m}$ es el caudal que impulsa la bomba en kg/s.
- g es la gravedad en m/s².
- η es el rendimiento cuyo valor estimado es de un 80%.
- H_b es la altura aportada por la bomba en m.

La energía total que la bomba debe suministrar al fluido se denomina carga de la bomba o altura manométrica (H_b) y se obtiene aplicando el balance de energía mecánica (Ecuación de Bernoulli) entre el punto de aspiración y el punto de impulsión:

$$H_b = \frac{P_{imp} - P_{asp}}{\rho \cdot g} + \frac{u_{imp}^2 - u_{asp}^2}{2 \cdot g} + (z_{imp} - z_{asp}) + h_f \quad \text{Ecuación 60}$$

Donde:

- P_{asp} y P_{imp} es la presión en la aspiración e impulsión, respectivamente. Expresado en Pa.
- u_{asp} y u_{imp} es la velocidad del fluido en las tuberías de entrada y salida, expresadas en m/s. Se determinan a partir del caudal volumétrico y el diámetro interno estandarizado de la tubería.
- $z_{imp} - z_{asp}$ es la diferencia de cotas geométricas, expresada en metros, entre la entrada y la salida.
- h_f es pérdida de carga por fricción en las tuberías, expresada en m. Este término debe incluir tanto las pérdidas mayores (fricción en tramos rectos calculada mediante el factor de fricción de Darcy o Fanning) como las pérdidas menores (accesorios, válvulas y codos presentes en el recorrido).

En el diseño hidráulico de la bomba también es necesario garantizar que no se produzca cavitación. Para ello, se debe comprobar que la carga neta positiva de aspiración disponible ($NPSH_d$) sea superior a la requerida por el equipo ($NPSH_r$).

El $NPSH_d$ se calcula mediante una forma adaptada de la ecuación de Bernoulli aplicada en la línea de succión, considerando la presión en la aspiración, la altura del líquido sobre la bomba, las pérdidas de carga en la aspiración y la presión de vapor del fluido.

$$NPSH_d = \frac{P_{asp} - P_v}{\rho \cdot g} \pm z_{asp} - h_{f,asp} \quad \text{Ecuación 61}$$

Donde:

- P_v es la presión de vapor de la leche estandarizada a la temperatura de operación, expresado en Pa.
- $h_{f,asp}$ es la pérdida de carga por fricción exclusivamente en el tramo de aspiración, expresado en m.

Para garantizar un margen de seguridad industrial óptimo, se debe seleccionar en catálogo una bomba que cumpla la siguiente inecuación:

$$NPSH_d > 1,2 \cdot NPSH_r \quad \text{Ecuación 62}$$

12 ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROYECTO

En este apartado se presenta la estimación económica global del proyecto. Para ello, se calcula el Coste Total de la Planta, compuesto por el Coste Total de Inversión (CTI) y el Coste Total de Producción (CTP).

La estimación del CTI se realiza aplicando el método de Chilton, ampliamente utilizado en ingeniería de procesos, el cual permite descomponer los costes en componentes directos e indirectos a partir del valor de los equipos principales y una serie de factores multiplicativos que representan tuberías, instrumentación, edificaciones, servicios auxiliares, ingeniería, construcción, contingencias y otros. Por su parte, el CTP incluye los gastos anuales asociados a la operación de la planta, considerando materias primas, energía, mano de obra, mantenimiento, servicios auxiliares y costes generales.

A través de esta metodología, se puede cuantificar los recursos económicos necesarios para llevar a cabo la construcción, puesta en marcha y operación anual de la planta, sirviendo como base para evaluar su viabilidad técnica y económica. Estimación de costes de equipos, materias primas y servicios auxiliares

12.1 Costes Equipos Principales de la Planta

La estimación del coste de adquisición de los equipos principales constituye el primer paso fundamental para la evaluación económica del proyecto. Aunque en las etapas de ingeniería básica es habitual recurrir a datos históricos y aplicar correlaciones matemáticas o índices de actualización, la literatura técnica establece que la fuente más exacta y fiable para determinar estos valores es la obtención de presupuestos directos por parte de los fabricantes y proveedores del sector.

Por ello, con el objetivo de dotar de un mayor rigor industrial, precisión y actualidad al análisis de viabilidad económica de esta instalación, la estimación del capital requerido para la maquinaria no se ha realizado mediante métodos de factorizados teóricos, sino a través de consultas directas a empresas especializadas.

En concreto, se ha establecido contacto con el proveedor de tecnología alimentaria Gémina Procesos Alimentarios [85]. Cabe destacar que, estas cifras (ver Tabla 16) proporcionadas directamente por el fabricante constituyen un rango de precios orientativo. El uso de estos valores asegura que la evaluación económica del presente refleje de forma veraz las condiciones actuales del mercado.

Tabla 16. Unidades de equipo de proceso y sus costes unitarios en €

EQUIPOS	Precio de maquinaria €/ud	Ud	Precio total
Silos de Almacenamiento	280.000,00 €	4	1.120.000,00 €
Intercambiador de placas	100.000,00 €	1	100.000,00 €
Separador centrífugo	300.000,00 €	1	300.000,00 €
Desaireador	120.000,00 €	1	120.000,00 €
Homogeneizador	320.000,00 €	1	320.000,00 €
Bombas de trasiego	5.000,00 €	3	15.000,00 €
Bombas de vacío	15.000,00 €	1	15.000,00 €
Módulo UHT indirecto	600.000,00 €	1	600.000,00 €
Tanques asépticos	250.000,00 €	4	1.000.000,00 €
Unidad de dosificación en línea	80.000,00 €	1	80.000,00 €
Envasadora aséptica	2.500.000,00 €	1	2.500.000,00 €
TOTAL			6.170.000,00 €

12.1.1 Costes de Energía Total aportada a la Planta

En el presente apartado se cuantifica el gasto derivado del consumo de energía y de los servicios auxiliares necesarios para la operación de la instalación. A partir del cálculo de balances y las energías principales de dichos equipos de la Tabla 17, se ha recogido la siguiente información para la energía total aportada a la planta:

Tabla 17. Energía total aportada en la planta.

Recurso Aportado	Maquinaria	Demanda Energética	Ud
Electricidad	- Silos de almacenamiento - Desnatadora centrífuga - Homogeneizador - Dosificadora aséptica - Envasadora aséptica	138,9	kWh
Gas Natural	- Tanque aséptico - Envasadora aséptica - Intercambiador de placas	1805,2	kWh
Agua de Refrigeración	- Módulo UHT indirecto - Intercambiador de placas	101,3	m ³
Agua de proceso	CIP	30	m ³

Para la construcción de esta tabla, se han seguido la metodología de diseño de Peters y Timmerhaus. La cual hace una distinción entre el agua empleada para refrigeración y el agua de proceso, dado que su naturaleza operativa y sus costes asociados difieren. El agua de refrigeración tiene como función la absorción de calor sensible a través de los intercambiadores, sin llegar a entrar en contacto físico con el producto lácteo ni con posibles contaminantes. Dado que opera en un circuito cerrado, el coste se limita a la energía eléctrica de bombeo y al volumen de reposición por evaporación o purgas. Durante las paradas de la planta (cada 8 horas), este circuito simplemente se apaga o entra en régimen de recirculación en vacío hacia la torre.

Por otra parte, el agua de proceso comprende el agua de red industrial empleada para los ciclos de limpieza in situ. Durante las paradas programadas cada 8 horas, este circuito inyecta soluciones acuosas con sosa y ácido para el arrastre de los residuos lácteos e incrustaciones de la maquinaria. A diferencia del agua de refrigeración,

esta corriente genera un efluente contaminado, por lo que su coste debe integrar no solo el abastecimiento, sino también las instalaciones de saneamiento y depuración.

Para la conversión de los requerimientos térmicos (potencia disipada o absorbida) a caudales volumétricos de servicios auxiliares, se ha aplicado el balance de energía en flujo estacionario mediante la siguiente expresión:

$$\dot{V} = \frac{Q \cdot 3600}{C_p \cdot \rho \cdot \Delta T} \quad \text{Ecuación 63}$$

Si bien en etapas preliminares de diseño es habitual recurrir a precios unitarios de referencia estandarizados en la literatura académica, con el objetivo de dotar al proyecto de mayor precisión y viabilidad industrial, se ha optado por prescindir de estos valores teóricos y realizar una investigación de mercado para aplicar las tarifas exactas vigentes en el entorno industrial real.

Para la valoración económica de los caudales obtenidos y del consumo eléctrico, se han recopilado diversas fuentes tarifarias actualizadas. En cuanto a la electricidad, se han utilizado los últimos valores de mercado publicados por Eurostat y la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) consolidados a finales de diciembre de 2025. Por su parte, el precio del gas natural se ha fijado a partir de las cotizaciones del Mercado Ibérico del Gas (MIBGAS), adoptando el valor promedio semestral proyectado para el invierno de 2026. Respecto al agua de proceso, la estimación se ha basado en el Documento Oficial de Tarifas y Cánones Vigentes publicado en el BOP por la red de EMASESA. El precio unitario calculado integra la Cuota de Abastecimiento, la Cuota de Saneamiento y Depuración (factor crítico de coste en las industrias alimentarias debido a la carga orgánica de sus efluentes) y el Canon Autonómico de Mejora de la Junta de Andalucía. Finalmente, para la gestión del agua cruda de aporte destinada a refrigeración, se han consultado las normativas de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), aplicando el Canon de Regulación y la Tarifa de Utilización del Agua publicados anualmente en el BOE para usos agroalimentarios.

Finalmente, el coste operativo anual asociado a estos consumos se ha determinado a partir de la potencia nominal y de los requerimientos térmicos individuales detallados en la Tabla 18 de equipos principales. Para garantizar el rigor de la estimación, se ha aplicado un factor de uso estándar del 80% sobre la potencia instalada de los motores. Asimismo, se ha llevado a cabo una segmentación temporal del régimen de operación: a los equipos de almacenamiento y mantenimiento isotérmico se les ha asignado un funcionamiento continuo de 7.920 horas anuales (330 días a 24 horas), mientras que a las unidades principales de procesamiento se les ha imputado un tiempo efectivo de 6.682,5 horas anuales, descontando de este modo los tiempos de inactividad programada exigidos para las limpiezas. El sumatorio total de las energías consumidas se ha multiplicado por las tarifas sectoriales descritas para conformar el coste anual definitivo de los servicios auxiliares.

Tabla 18. Estimación de la demanda total de consumos

Energía/Combustible	Precio del mercado	Unidad	Fuentes
Electricidad	0,1156	€/kWh	[86], [87]
Gas Natural	0,0421	€/kWh	[88]
Agua de Refrigeración	0,05	€/m ³	[89]
Agua de proceso	3	€/m ³	[90]

12.1.2 Costes de Materias Primas

A continuación, la Tabla 19 expone la demanda de materia prima clasificada según cada línea de producción de la planta

Tabla 19. Demanda de materia prima según línea

Materias primas (kg/h)	Línea 1: Entera	Línea 2: Semidesnatada	Línea 3: Desnatada
Leche cruda	20497	20497	20497
Lactasa	3,95	3,74	3,641

Se ha establecido un precio aproximado de 0,53 €/litro en origen [91]. Este valor unitario no representa únicamente el precio base de la leche, sino que integra los incrementos asociados al cumplimiento de los estándares de composición y calidad exigidos, así como la repercusión de la logística de recogida en las explotaciones ganaderas.

En relación con el aditivo enzimático (lactasa), su valoración económica fluctúa en función de tres variables: la pureza, la actividad enzimática y el volumen de compra. Tal y como se confirmó durante la visita técnica a las instalaciones de COVAP, a nivel industrial la enzima se adquiere previamente filtrada. Por consiguiente, la estimación presupuestaria se ha realizado empleando las tarifas de lactasa líquida de grado industrial, suministrada en bidones de 25 kg, tomando como referencia al proveedor especializado ASA Spezialenzyme GmbH. [92]

Tabla 20. Demanda total de materias primas

Materias primas	Demanda Total (€/año)	Coste	Ud
Leche cruda	70.410.731,71 €	0,53	€/L
Lactasa	3.510.651,38 €	133	€/kg

12.2 Coste Total de Inversión de la Planta

En la siguiente tabla (ver Tabla 21) se presentan las distintas partidas que conforman la estimación del Coste Total de Inversión (CTI). Para llevar a cabo este cálculo, se ha optado por aplicar la metodología factorial basada en el método de Lang con las modificaciones de Peters y Timmerhaus (procedimiento que integra los criterios de Chilton). Estos factores se recogen en la Tabla 27 del Anexo E.

Este enfoque toma como magnitud base única y exclusiva el coste de adquisición de los equipos entregados. Aunque desglosar la inversión mediante factores específicos para cada categoría resulta un proceso más laborioso frente al uso de un coeficiente global, permite obtener una estimación económica notablemente más precisa, rigurosa y adaptable a las exigencias particulares de una planta de procesamiento lácteo.

Cada categoría de coste se determina a partir de expresiones que aplican dichos factores multiplicativos sobre el coste base de la maquinaria. Con el objetivo de garantizar la solidez financiera del proyecto, los valores de estos coeficientes se han seleccionado bajo un escenario económico conservador, proyectando las condiciones más desfavorables. En concreto, el cálculo se fundamenta en las siguientes premisas técnicas: se asume que la planta estará completamente automatizada; los edificios y la preparación del terreno se circunscriben a una instalación interna; los servicios auxiliares requieren de una pequeña ampliación; las tuberías y las líneas exteriores operan como una unidad integrada; los trabajos de ingeniería y construcción presentan una complejidad simple; las contingencias y los honorarios del contratista contemplan un diseño de proceso sujeto a posibles variaciones; y, finalmente, se ha adoptado un factor de escala grande.

Tabla 21. Cálculo del Coste Total de Inversión

Tipo de coste	Expresión	f_i	C_i (€)
Equipo comprado	$C_1 = \sum C_{T,Equipo}$	1	6.170.000,00 €
Instalación de equipo	$C_2 = f_2 \cdot C_1$	0,47	2.899.900,00 €
Instrumentos y control (instalados)	$C_3 = f_3 \cdot C_1$	0,18	1.110.600,00 €
Tuberías (instalados)	$C_4 = f_4 \cdot C_1$	0,66	4.072.200,00 €
Eléctricos (instalados)	$C_5 = f_5 \cdot C_1$	0,11	678.700,00 €
Edificios (incluye servicios)	$C_6 = f_6 \cdot C_1$	0,18	1.110.600,00 €
Mejoras del terreno	$C_7 = f_7 \cdot C_1$	0,1	617.000,00 €
Servicios auxiliares (instalados)	$C_8 = f_8 \cdot C_1$	0,7	4.319.000,00 €
Terreno	$C_9 = f_9 \cdot C_1$	0,06	370.200,00 €
Coste Directo Total	$C_{10} = \sum_2^9 C_i$		21.348.200,00 €
Coste de Arranque	$C_{11} = f_{10} \cdot C_{10}$	0,02	426.964,00 €
Ingeniería de supervisión	$C_{12} = f_{11} \cdot C_1$	0,33	2.036.100,00 €
Gastos de construcción	$C_{13} = f_{12} \cdot C_1$	0,41	2.529.700,00 €
Contratista	$C_{14} = f_{13} \cdot C_1$	0,21	1.295.700,00 €
Contingentes	$C_{15} = f_{14} \cdot C_1$	0,42	2.591.400,00 €
Coste Indirecto Total	$C_{16} = \sum_{11}^{15} C_i$		8.452.900,00 €
Inversión total	$CTI = C_{10} + C_{11} + C_{16}$		30.228.064,00 €

12.3 Coste Total de la Producción de la Planta

El Coste Total de Producción (CTP) engloba los gastos operativos necesarios para mantener la planta en funcionamiento durante un ejercicio anual. Este concepto se divide fundamentalmente en dos bloques: los costes directos de fabricación (adquisición de materias primas como la leche cruda, consumo de servicios auxiliares, mano de obra directa y materiales de envasado) y los costes indirectos o fijos (gastos generales de planta, gastos administrativos y de ventas).

A diferencia de la Inversión Fija de Capital (FCI), que se determinó previamente mediante el método de factores de Lang, la estimación del CTP en etapas de ingeniería básica se realiza a través de un desglose porcentual. Siguiendo la metodología de obras clásicas en el diseño de plantas de proceso, como la de Peters y Timmerhaus, no se emplea un factor global único, sino que ciertas partidas de las que aún no se dispone de valor exacto estiman de forma factorizada utilizando la FCI como base de cálculo. Cada categoría de coste se obtiene a partir de expresiones que integran factores multiplicativos, seleccionados bajo un escenario económico conservador (reflejados en la Tabla 28 del Anexo E).

12.3.1 Estimación de la Mano de Obra (MOD)

Para determinar el coste de la Mano de Obra Directa (MOD), se ha calculado analíticamente la dotación de operarios necesaria por cada unidad de equipo ($N_{op,i-Eq_i}$) mediante los factores descritos en la literatura, aplicando un factor de capacidad (FC) del 85% y un salario base de 17,13 €/h (ver Tabla 29 de Anexo E).

Dado que la producción láctea requiere un suministro continuo (la recepción de leche no se detiene), se ha establecido que la planta opere 330 días al año (7.920 horas anuales), reservando el tiempo restante o los fines de semana para labores de mantenimiento general y limpiezas profundas de los equipos (CIP). Según el Convenio Colectivo Estatal de Industrias Lácteas, un operario en España trabaja una media de 1.750 horas efectivas al año. Por consiguiente, para garantizar la cobertura ininterrumpida de los turnos durante 24 horas al día, se ha aplicado un factor multiplicativo (FM) estándar en la industria de 4,5. [93]

$$MOD = \sum N_{op,i} \cdot Eq_i \cdot Salario \cdot FC \cdot FM \cdot H \text{ [€/año]}$$

Ecuación 64

Este resultado teórico resulta altamente coherente con la realidad industrial del sector. A modo de verificación, tras diversas consultas a expertos y visitas a las instalaciones de COVAP, se ha comprobado que operan sus líneas principales con unos 5 operarios por turno, estando la ligera diferencia justificada por la escala de producción y el elevado grado de automatización asumido en el diseño de nuestra planta. Cabe destacar que los salarios del personal de mantenimiento y de control de calidad no se incluyen en la ecuación de la MOD, sino que se contabilizan rigurosamente dentro de los Gastos Generales de Planta (Costes Indirectos).

12.3.2 Costes de Envasado e Impacto Fiscal (El caso Tetra Brik)

En la partida de materiales auxiliares, adquiere un peso significativo el coste del envase multicapa tipo Tetra Brik. Al ser un material esterilizado compuesto por diversas capas (cartón, polietileno y aluminio), su precio de adquisición es altamente sensible a las fluctuaciones en el mercado de polímeros derivados del petróleo, afectadas recientemente por tensiones geopolíticas. Además, el compromiso de Tetra Pak con la trazabilidad exige el uso del sello FSC MIX (asegurando que al menos el 70% del material proviene de bosques certificados), lo que añade complejidad logística y de auditoría.

A esto hay que sumarle una importante carga impositiva. Desde el 1 de enero de 2023, la Ley 7/2022 establece en España un impuesto de 0,45 euros por kilogramo de plástico virgen no reciclado contenido en los envases. Dado que un envase Tetra Brik de 1 litro contiene aproximadamente entre 5,7 y 7,2 gramos de polietileno, el impacto fiscal escala rápidamente en volúmenes industriales: por cada millón de envases, la empresa fabricante debe afrontar una carga fiscal adicional de entre 2.500 y 3.200 euros derivados exclusivamente de las capas plásticas. Para mitigar este sobrecoste, proveedores como Tetra Pak están introduciendo polímeros reciclados respaldados por la certificación de balance de masas ISCC Plus (de acuerdo con normativas como la UNE-EN 15343), lo que permite justificar el porcentaje de plástico reciclado y, por ende, deducir la base imponible del impuesto, promoviendo una economía circular efectiva [94].

A continuación, la Tabla 22 expone el desglose detallado para el cálculo del coste total de producción, diferenciando claramente entre los costes directos (DPC) e indirectos (CPI) asociados a la planta.

Tabla 22. Cálculo del Coste Total de Producción

Costes	Expresión	f _i	C _i (€/año)
Materias primas	-		73.921.383,08 €
Electricidad y agua de enfriamiento	-		1.481.996,42 €
Mantenimiento	$C_3 = f_3 \cdot CTI$	0,1	3.022.806,40 €
Materiales auxiliares	$C_4 = f_4 \cdot C_3$	1	3.022.806,40 €
Empaquetado y envío	Despreciable		0
Mano de obra directa (MOD)	Ecuación 64		1.245.446,93 €
Costes de laboratorio (C7)	$C_7 = f_7 \cdot MOD$	0,2	249.089,39 €
Supervisión	$C_8 = f_8 \cdot MOD$	0,2	249.089,39 €
Dirección en planta	$C_9 = f_9 \cdot MOD$	0,5	622.723,46 €
Cargas de capital	$C_{10} = f_{10} \cdot CTI$	0,15	4.534.209,60 €
Seguros	$C_{11} = f_{11} \cdot CTI$	0,01	302.280,64 €
Impuestos locales	$C_{12} = f_{12} \cdot CTI$	0,02	604.561,28 €
Royalties	$C_{13} = f_{13} \cdot CTI$	0,01	302.280,64 €
Coste de producción directo	$CPD = \sum_1^{13} C_i$		89.558.673,62 €
Generales	$C_{15} = f_{15} \cdot C_4$	0,6	1.813.683,84 €
Gastos de administración	$C_{16} = f_{16} \cdot CTI$	0,02	604.561,28 €
Impuestos	$C_{17} = f_{17} \cdot CTI$	0,01	302.280,64 €
Seguros	$C_{18} = f_{18} \cdot CTI$	0,01	302.280,64 €
Recuperación capital	$C_{19} = f_{19} \cdot CTI$	1	30.228.064,00 €
Coste de producción indirecto	$CPI = \sum_1^{13} C_i$		33.250.870,40 €
Coste Total de Producción (CTP)	$CTP = CPD + CPI$		122.809.544,02 €

12.4 Análisis de Rentabilidad

Para analizar la viabilidad económica del proyecto, se deben determinar tres indicadores clave: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PB). Para poder calcularlos, es indispensable conocer los flujos de caja anuales del proyecto.

12.4.1 Estimación de Flujos de Caja

Los costes de inversión y de operación se han estimado previamente aplicando el método de Chilton. En cuanto a los ingresos por ventas, estos se han determinado teniendo en cuenta la producción dada durante la campaña y, además, se establece un precio de venta representado en la Tabla 23.

Tabla 23. Distribución del volumen de producción e ingresos brutos anuales según la cuota de mercado en España.

	Consumo en España (%)	Precio de venta (€/L)	Volumen anual (L/año)	Ingresos brutos anuales
Leche entera sin lactosa	20	1,09	26.730.000	29.135.700,00 €
Leche semidesnatada sin lactosa	50	0,99	66.825.000	66.156.750,00 €
Leche desnatada sin lactosa	30	0,95	40.095.000	38.090.250,00 €
INGRESO TOTAL				133.382.700,00 €

Por otro lado, la amortización de los equipos, que representa la depreciación anual del capital invertido en bienes materiales, se ha calculado considerando un periodo lineal de amortización de 15 años. Esta depreciación se incorpora como un coste contable anual que refleja la pérdida de valor de los activos fijos.

Con estos datos, se procede al cálculo del beneficio antes de impuestos (BAI) mediante la siguiente expresión:

$$BAI = Ventas - Costes - Depreciación \quad \text{Ecuación 65}$$

A partir del BAI, se calcula el importe de los impuestos aplicando el tipo impositivo vigente (t), que en España es del 25%, según:

$$Imp = BAI \cdot t \quad \text{Ecuación 66}$$

El beneficio neto (BN) se obtiene restando los impuestos al beneficio antes de impuestos:

$$BN = BAI - Imp \quad \text{Ecuación 67}$$

Finalmente, los flujos netos de caja (FNC), que reflejan el efectivo disponible para la empresa, se determinan sumando nuevamente la depreciación al beneficio neto, dado que esta no implica una salida real de efectivo:

$$FCN = BN + Depreciación \quad \text{Ecuación 68}$$

Estos flujos netos de caja constituyen la base sobre la cual se realiza el análisis financiero del proyecto, y sus valores anuales se recogen en la Tabla 30 del Anexo E.

12.4.2 Valor Actual Neto (VAN)

El VAN permite conocer cuánto valor genera un proyecto descontando los flujos futuros a valor presente. Es un criterio de decisión basado en la actualización del dinero en el tiempo, y su resultado indica si el valor generado compensa la inversión inicial. La fórmula empleada es la siguiente:

$$VAN = -A + \sum_{i=0}^n \frac{FNC_i}{(1+k)^i} \quad \text{Ecuación 69}$$

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 (15 años)

12.4.3 Tasa Interna de Rentabilidad (TIR)

La TIR representa la tasa de descuento que hace que el VAN sea nulo. Para obtenerla, se resuelve la ecuación:

$$0 = -A + \sum_{i=0}^n \frac{FNC_i}{(1+k)^i} \quad \text{Ecuación 70}$$

La TIR del proyecto es aproximadamente 27.14%, significativamente superior al 8% que representa el coste de capital. Esto confirma que la inversión genera una rentabilidad mayor que el coste de oportunidad del capital, haciendo al proyecto financieramente viable y atractivo para los inversores.

12.4.4 Payback (PB)

El Payback indica cuántos años son necesarios para recuperar la inversión inicial mediante los flujos netos generados anualmente. No considera el valor del dinero en el tiempo, pero es útil como indicador de liquidez. Se calcula dividiendo la inversión inicial entre el flujo neto anual:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{FNC \text{ actual}} \quad \text{Ecuación 71}$$

El proyecto recuperará la inversión inicial en aproximadamente 3 años y 8 meses, lo que indica que los flujos netos de caja serán suficientes para cubrir el desembolso inicial en ese periodo. Este corto plazo de recuperación aporta confianza sobre la viabilidad y liquidez del proyecto, ya que después de ese tiempo comenzará a generar beneficios netos.

13 DISCUSIONES

Tras haber establecido la ingeniería del proceso y completado los cálculos de dimensionamiento pertinentes en los capítulos anteriores, resulta fundamental realizar un análisis crítico de las alternativas tecnológicas evaluadas. El objetivo de este apartado es justificar de manera técnica y operativa las decisiones clave adoptadas para la configuración de la planta, argumentando por qué se han seleccionado determinados métodos.

En la fase de esterilización térmica, se ha escogido el método UHT de calentamiento indirecto en lugar del directo debido a una combinación de eficiencia operativa, reducción de costes y sinergia con las etapas posteriores. Desde el punto de vista del rendimiento, los sistemas indirectos permiten una recuperación térmica muy superior (alcanzando a menudo entre el 80% y el 90%), reutilizando el calor de la leche estéril para precalentar la leche cruda y reduciendo drásticamente los costes de operación. Por último, operar en un circuito cerrado tubular garantiza una presión y un caudal volumétrico completamente estables, sin las fluctuaciones de dilución y evaporación del método directo. No obstante, se asume como contrapartida que el perfil de calentamiento indirecto es más lento, lo que incrementa ligeramente la carga térmica total sobre el producto. Esto puede propiciar una mayor aparición de lactulosa y reacciones de Maillard. Una mejora evaluable a futuro sería la optimización del diseño térmico mediante regeneración avanzada o una configuración híbrida para acortar aún más el tiempo de rampa de subida.

La elección de un intercambiador de calor de diseño tubular para el módulo UHT, descartando la tecnología de placas, responde a la necesidad de mantener la máxima integridad aséptica. Al operar en la zona estéril de la planta, el riesgo de recontaminación debe ser nulo; los intercambiadores de placas poseen juntas de goma que pueden fallar por fatiga térmica, permitiendo que el fluido de servicio contamine el producto estéril. Los sistemas tubulares, al estar completamente soldados y carecer de juntas en contacto con el producto, eliminan este peligro. Asimismo, el diseño tubular soporta las elevadas presiones necesarias para evitar la ebullición de la leche a altas temperaturas y asegura una hidráulica predecible. Sin embargo, esta tecnología penaliza el diseño al requerir un mayor espacio físico en la planta y presentar una menor flexibilidad. A diferencia de un sistema de placas, un módulo tubular no permite ampliaciones de capacidad sencillas (añadiendo placas), por lo que obliga a un dimensionamiento con un margen mayor que eleva el coste de inversión. El aspecto susceptible de mejora en este montaje radica en la dificultad de inspección física.

En la configuración interna de este intercambiador tubular, se ha determinado que el fluido caliente (la leche) circule exclusivamente por el interior de los tubos, relegando los fluidos de servicio (agua o vapor) a la carcasa. Esta es una advertencia de diseño industrial irrenunciable: en la industria alimentaria, un producto estéril jamás debe fluir por el lado de la carcasa. Dicha sección contiene zonas muertas, recovecos y deflectores donde el flujo se estanca, dificultando una limpieza eficaz mediante protocolos automáticos CIP. Conducir la leche por el interior de los tubos rectos asegura un perfil de velocidades adecuado, eliminando cualquier riesgo de acumulación o ensuciamiento residual que comprometa la higiene.

Finalmente, la integración de la tecnología de dosificación aséptica en línea culmina y justifica el diseño integral de esta planta, imponiéndose frente a la hidrólisis enzimática tradicional en tanques por lotes. Puesto que la enzima lactasa es un ingrediente termosensible, el tratamiento UHT la desnaturalizaría si se añadiese al inicio del proceso; inyectarla con precisión justo antes del llenado aséptico supera esta barrera. Esta metodología no solo transforma la planta en un proceso continuo de alto rendimiento, sino que reduce el consumo de enzima al optimizar las condiciones de reacción. Como limitación, esta decisión genera una dependencia tecnológica absoluta de la instrumentación y el control (PLC).

14 CONCLUSIONES

El desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado ha permitido demostrar la viabilidad técnica y económica para la implantación de una planta industrial de producción de leche UHT sin lactosa con una capacidad nominal de procesamiento de 20.000 L/h.

Desde el punto de vista técnico, se ha completado el diseño de la línea de proceso y el dimensionamiento de los equipos principales. La integración de sistemas térmicos eficientes y la selección de maquinaria adaptada a las rigurosas exigencias del sector lácteo garantizan un producto final (en sus variedades entera, semidesnatada y desnatada) que cumple con los estándares de calidad cumpliendo con el límite analítico inferior al 0,01% de lactosa residual para autorizar la mención "Sin lactosa" en el etiquetado del producto final.

En lo referente al estudio de mercado, el análisis exhaustivo del sector lácteo confirma la absoluta viabilidad comercial y estratégica del proyecto. La elección del tratamiento térmico UHT minimiza el riesgo de la inversión, dado que este formato representa el 96 % del consumo total de leche líquida en España y mantiene una demanda altamente estable y consolidada. Además, la especialización en la línea sin lactosa resulta un acierto clave para la rentabilidad, este segmento demuestra un crecimiento del 7,3 %, un ritmo que triplica al del sector lácteo tradicional. Esta categoría ha dejado de ser un nicho exclusivo para posicionarse como un producto de alto valor añadido, alcanzando una tasa de penetración del 39,5 % en los hogares españoles y suponiendo ya el 15 % del valor económico total del mercado de la leche envasada a nivel nacional. Por consiguiente, la capacidad de producción diseñada para la planta está respaldada por una demanda en constante aumento y un consumo per cápita afianzado de 8,66 litros anuales, lo que garantiza la viabilidad del proyecto y asegura la absorción del producto en el mercado actual.

En el ámbito económico, los resultados obtenidos en el análisis de rentabilidad confirman que el proyecto es financieramente robusto y altamente atractivo. Para una vida útil estimada de la instalación de 15 años y asumiendo una tasa de descuento del 8 % como coste de oportunidad del capital, el proyecto arroja un Valor Actual Neto (VAN) positivo, lo que indica la creación de valor real desde el inicio de las operaciones. Asimismo, la inversión genera una Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) del 27,14 %, un valor que supera holgadamente la tasa de descuento exigida.

Por su parte, en los criterios de estimación de inversiones de este manual de referencia, se establece que una planta de procesamiento químico típicamente recupera su inversión en un rango de 3 a 5 años, asumiendo una media de 4 años. Al obtener un resultado de 3,67 años (3 años y 8 meses), se sitúa en el punto medio-bajo de este estándar industrial, lo cual demuestra que es un periodo altamente competitivo y realista. [95]

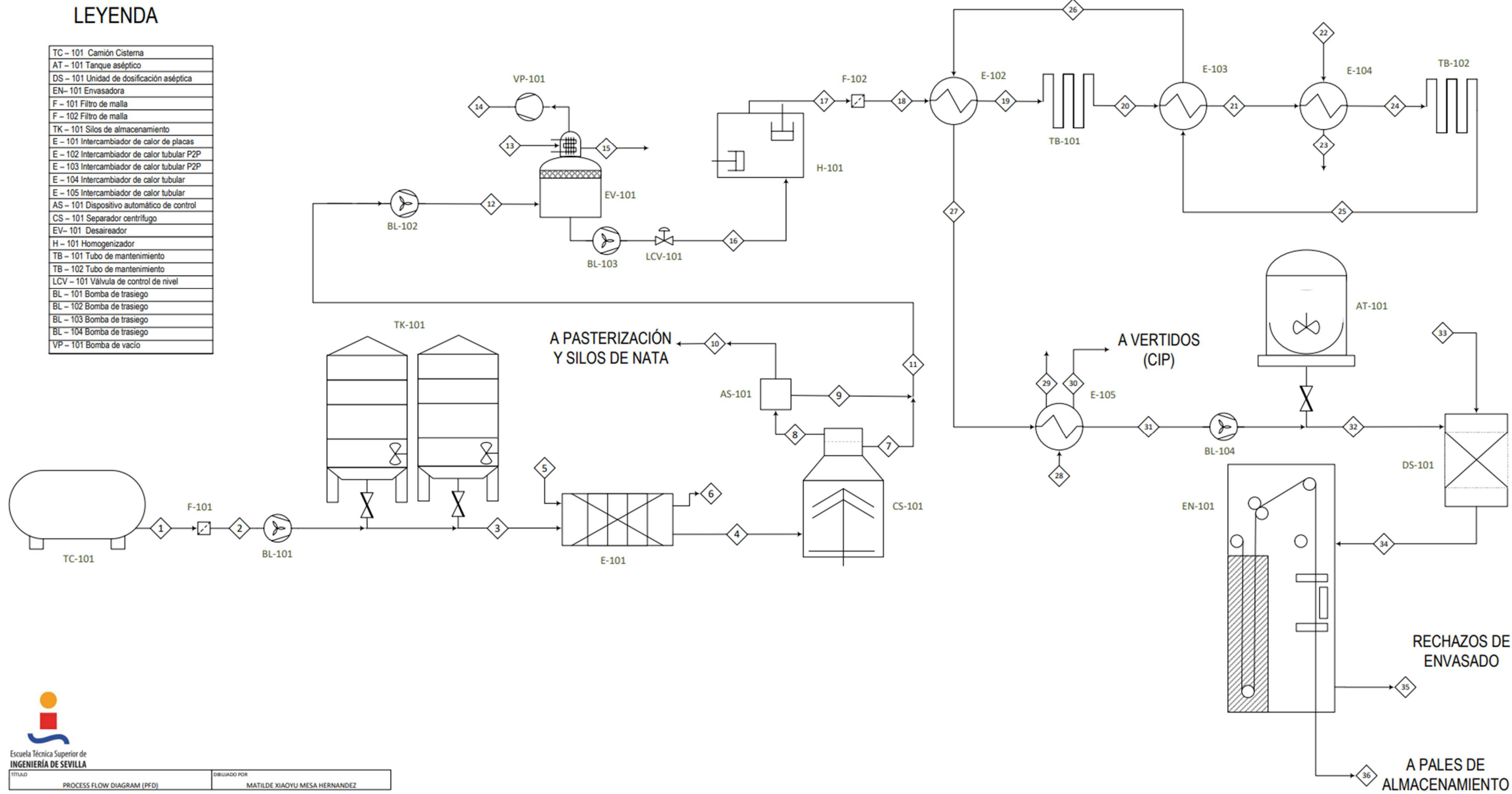
Finalmente, tomando en consideración el dinamismo del sector alimentario analizado en el estudio de mercado, se identifican claras y prometedoras líneas de expansión y diversificación futura para la planta:

- En primer lugar, debido al ritmo de vida actual y a la consolidación de la tendencia de consumo *on the go* o *take away*, resulta estratégico plantear la incorporación de líneas de envasado en formatos individuales reducidos (entre 0,25 L y 0,33 L), lo cual incrementaría significativamente la penetración del producto en canales de venta por impulso y máquinas expendedoras.
- En segundo lugar, ante el auge de la nutrición especializada y la fuerte demanda de productos enriquecidos, la planta presenta un gran potencial para desarrollar una línea de productos altos en proteínas, como batidos lácteos con sabor a cacao. La infraestructura diseñada permitiría absorber esta producción diversificada con adaptaciones menores, posicionando a la empresa a la vanguardia de las tendencias del mercado lácteo contemporáneo.

ANEXO A. DIAGRAMA DE PROCESO (PFD)

LEYENDA

TC - 101	Camión Cisterna
AT - 101	Tanque aséptico
DS - 101	Unidad de dosificación aséptica
EN - 101	Envasadora
F - 101	Filtro de malla
F - 102	Filtro de malla
TK - 101	Silos de almacenamiento
E - 101	Intercambiador de calor de placas
E - 102	Intercambiador de calor tubular P2P
E - 103	Intercambiador de calor tubular P2P
E - 104	Intercambiador de calor tubular
E - 105	Intercambiador de calor tubular
AS - 101	Dispositivo automático de control
CS - 101	Separador centrífugo
EV - 101	Desaireador
H - 101	Homogenizador
TB - 101	Tubo de mantenimiento
TB - 102	Tubo de mantenimiento
LCV - 101	Válvula de control de nivel
BL - 101	Bomba de trasiego
BL - 102	Bomba de trasiego
BL - 103	Bomba de trasiego
BL - 104	Bomba de trasiego
VP - 101	Bomba de vacío



ANEXO B. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

LÍNEA 1: LECHE ENTERA SIN LACTOSA																		
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Temperatura (°C)	6	6	6	72	75	70	70	70	70	70	70	70	25	60	35	60	69	95
Presión (bar)	1	1	3	3	3	3	1	1	1	1	1	3	3	0,2	3	250	1	5
Flujo másico (kg/h)	20497	20497	20497	20497	22	22	19779	717	729	56	20441	20441	0	20	0	20420	20420	20420
Título de vapor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Flujo másico componentes (kg/h)																		
Agua	17994,3	17994,3	17994,3	17994,3	22,5	22,5	17994,3	-	30,7	30,7	17963,7	17963,7	-	-	-	17945,7	17945,7	17945,7
Carbohidratos	964,4	964,4	964,4	964,4	-	-	964,4	-	1,6	1,6	962,7	962,7	-	-	-	961,8	961,8	961,8
Grasa	717,4	717,4	717,4	717,4	-	-	-	717,4	694,9	22,5	694,9	694,9	-	-	-	694,2	694,2	694,2
Proteínas	677,0	677,0	677,0	677,0	-	-	677,0	-	1,2	1,2	675,9	675,9	-	-	-	675,2	675,2	675,2
Minerales	143,6	143,6	143,6	143,6	-	-	143,6	-	0,2	0,2447	143,4	143,4	-	-	-	143,2	143,2	143,2
Lactasa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,4	-	-	-	-
Corrientes	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Temperatura (°C)	95	95	121	145	124	139	139	109	78	10	20	25	25	25	25	25	25	25
Presión (bar)	5	5	5	1	1	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	20420	20420	20420	16059	16059	20420	20420	20420	20420	99616	99616	204	20216	20216	4	20220	121	20099
Título de vapor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo másico componentes (kg/h)																		
Agua	17945,7	17945,7	17945,7	16059,0	16059,0	17945,7	17945,7	17945,7	17945,7	99616,0	99616,0	179,5	17766,2	17766,2	-	17766,2	106,6	17659,6
Carbohidratos	961,8	961,8	961,8	-	-	961,8	961,8	961,8	961,8	-	-	9,6	952,2	952,2	-	952,2	5,7	946,4
Grasa	694,2	694,2	694,2	-	-	694,2	694,2	694,2	694,2	-	-	6,9	687,3	687,3	-	687,3	4,1	683,2
Proteínas	675,2	675,2	675,2	-	-	675,2	675,2	675,2	675,2	-	-	6,8	668,4	668,4	-	668,4	4,0	664,4
Minerales	143,2	143,2	143,2	-	-	143,2	143,2	143,2	143,2	-	-	1,4	141,8	141,8	-	141,8	0,9	141,0
Lactasa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,96	3,96	0,0	3,9
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

LÍNEA 2: LECHE SEMIDESNATADA SIN LACTOSA																		
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Temperatura (°C)	6	6	6	72	75	70	70	70	70	70	70	70	25	60	35	60	69	95
Presión (bar)	1	1	3	3	3	3	1	1	1	1	1	3	3	0,2	3	250	1	5
Flujo másico (kg/h)	20497	20497	20497	20497	22	22	19779	717	941	1118	19379	19379	0	19	0	19359	19359	19359
Título de vapor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Flujo másico componentes (kg/h)																		
Agua	17994,3	17994,3	17994,3	17994,3	22,5	22,5	17994,3	-	610,3	610,3	17384,0	17384,0	-	-	-	17366,6	17366,6	17366,6
Carbohidratos	964,4	964,4	964,4	964,4	-	-	964,4	-	32,7	32,7	931,7	931,7	-	-	-	930,8	930,8	930,8
Grasa	717,4	717,4	717,4	717,4	-	-	-	717,4	270,2	447,2	270,2	270,2	-	-	-	269,9	269,9	269,9
Proteínas	677,0	677,0	677,0	677,0	-	-	677,0	-	23,0	23,0	654,1	654,1	-	-	-	653,4	653,4	653,4
Minerales	143,6	143,6	143,6	143,6	-	-	143,6	-	4,9	4,871	138,8	138,8	-	-	-	138,6	138,6	138,6
Lactasa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,4	-	-	-	-
Flujo másico componentes (kg/h)																		
Corrientes	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Temperatura (°C)	95	95	121	145	124	139	139	109	78	10	20	25	25	25	25	25	25	25
Presión (bar)	5	5	5	1	1	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	19359	19359	19359	16059	16059	19359	19359	19359	19359	99616	99616	194	19166	19166	4	19169	115	19054
Título de vapor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo másico componentes (kg/h)																		
Agua	17366,6	17366,6	17366,6	16059,0	16059,0	17366,6	17366,6	17366,6	17366,6	99616,0	99616,0	173,7	17193,0	17193,0	-	17193,0	103,2	17089,8
Carbohidratos	930,8	930,8	930,8	-	-	930,8	930,8	930,8	930,8	-	-	9,3	921,4	921,4	-	921,4	5,5	915,9
Grasa	269,9	269,9	269,9	-	-	269,9	269,9	269,9	269,9	-	-	2,7	267,2	267,2	-	267,2	1,6	265,6
Proteínas	653,4	653,4	653,4	-	-	653,4	653,4	653,4	653,4	-	-	6,5	646,9	646,9	-	646,9	3,9	643,0
Minerales	138,6	138,6	138,6	-	-	138,6	138,6	138,6	138,6	-	-	1,4	137,2	137,2	-	137,2	0,8	136,4
Lactasa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,74	3,74	0,0	3,7
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

LÍNEA 3: LECHE DESNATADA SIN LACTOSA																		
Corrientes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Temperatura (°C)	6	6	6	72	75	70	70	70	70	70	70	70	25	60	35	60	69	95
Presión (bar)	1	1	3	3	3	3	1	1	1	1	1	3	3	0,2	3	250	1	5
Flujo másico (kg/h)	20497	20497	20497	20497	22	22	19779	717	1039	1609	18888	18888	0	19	0	18869	18869	18869
Título de vapor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
Flujo másico componentes (kg/h)																		
Agua	17994,3	17994,3	17994,3	17994,3	22,5	22,5	17994,3	-	878,1	878,1	17116,2	17116,2	-	-	-	17099,1	17099,1	17099,1
Carbohidratos	964,4	964,4	964,4	964,4	-	-	964,4	-	47,1	47,1	917,3	917,3	-	-	-	916,4	916,4	916,4
Grasa	717,4	717,4	717,4	717,4	-	-	-	717,4	74,0	643,4	74,0	74,0	-	-	-	73,9	73,9	73,9
Proteínas	677,0	677,0	677,0	677,0	-	-	677,0	-	33,0	33,0	644,0	644,0	-	-	-	643,3	643,3	643,3
Minerales	143,6	143,6	143,6	143,6	-	-	143,6	-	7,0	7,0	136,6	136,6	-	-	-	136,5	136,5	136,5
Lactasa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,9	-	-	-	-
Flujo másico componentes (kg/h)																		
Corrientes	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Temperatura (°C)	95	95	121	145	124	139	139	109	78	10	20	25	25	25	25	25	25	25
Presión (bar)	5	5	5	1	1	5	5	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Flujo másico (kg/h)	18869	18869	18869	16059	16059	18869	18869	18869	18869	99616	99616	189	18681	18681	4	18684	112	18572
Título de vapor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Flujo másico componentes (kg/h)																		
Agua	17099,1	17099,1	17099,1	16059,0	16059,0	17099,1	17099,1	17099,1	17099,1	99616,0	99616,0	171,0	16928,1	16928,1	-	16928,1	101,6	16826,5
Carbohidratos	916,4	916,4	916,4	-	-	916,4	916,4	916,4	916,4	-	-	9,2	907,2	907,2	-	907,2	5,4	901,8
Grasa	73,9	73,9	73,9	-	-	73,9	73,9	73,9	73,9	-	-	0,7	73,2	73,2	-	73,2	0,4	72,7
Proteínas	643,3	643,3	643,3	-	-	643,3	643,3	643,3	643,3	-	-	6,4	636,9	636,9	-	636,9	3,8	633,1
Minerales	136,5	136,5	136,5	-	-	136,5	136,5	136,5	136,5	-	-	1,4	135,1	135,1	-	135,1	0,8	134,3
Lactasa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,77	3,77	0,0	3,7
Aire	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ANEXO C. TABLAS DE DIMENSIONES DE EQUIPOS

Tabla 24. Propiedades termo físicas en función de la temperatura para componentes [78]

Property	Component	Temperature function	Standard error	Standard % error
ρ (kg/m ³)	Protein	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}T$	39.9501	3.07
	Fat	$\rho = 9.2559 \times 10^2 - 4.1757 \times 10^{-1}T$	4.2554	0.47
	Carbohydrate	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}T$	93.1249	5.98
	Fiber	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}T$	8.2687	0.64
	Ash	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}T$	2.2315	0.09
	Water	$\rho = 9.9718 \times 10^2 + 3.1439 \times 10^{-3}T - 3.7574 \times 10^{-3}T^2$	2.1044	0.22
	Ice	$\rho = 9.1689 \times 10^2 - 1.3071 \times 10^{-1}T$	0.5382	0.06

Property	Component	Temperature function	Standard error	Standard % error
c_p (kJ/kg°C)	Protein	$c_p = 2.0082 + 1.2089 \times 10^{-3}T - 1.3129 \times 10^{-6}T^2$	0.1147	5.57
	Fat	$c_p = 1.9842 + 1.4733 \times 10^{-3}T - 4.8008 \times 10^{-6}T^2$	0.0236	1.16
	Carbohydrate	$c_p = 1.5488 + 1.9625 \times 10^{-3}T - 5.9399 \times 10^{-6}T^2$	0.0986	5.96
	Fiber	$c_p = 1.8459 + 1.8306 \times 10^{-3}T - 4.6509 \times 10^{-6}T^2$	0.0293	1.66
	Ash	$c_p = 1.0926 + 1.8896 \times 10^{-3}T - 3.6817 \times 10^{-6}T^2$	0.0296	2.47
	Water ^a	$c_p = 4.1289 - 5.3062 \times 10^{-3}T + 9.9516 \times 10^{-4}T^2$	0.0988	2.15
	Water ^b	$c_p = 4.1289 - 9.0864 \times 10^{-5}T + 5.4731 \times 10^{-6}T^2$	0.0159	0.38
	Ice	$c_p = 2.0623 + 6.0769 \times 10^{-3}T$	0.0014	0.07

Source: Choi and Okos (1986).

^aFor the temperature range of -40°C to 0°C

^bFor the temperature range of 0°C to 150°C

Table 5.4 Relationships between thermal conductivity and temperature for individual food components

Property	Component	Temperature function	Standard error	Standard % error
k (W/mX)	Protein	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}T - 2.7178 \times 10^{-6}T^2$	0.012	5.91
	Fat	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-4}T - 1.7749 \times 10^{-7}T^2$	0.0032	1.95
	Carbohydrate	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}T - 4.3312 \times 10^{-6}T^2$	0.0134	5.42
	Fiber	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}T - 3.1683 \times 10^{-6}T^2$	0.0127	5.55
	Ash	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}T - 2.9069 \times 10^{-6}T^2$	0.0083	2.15
	Water	$k = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3}T - 6.7036 \times 10^{-6}T^2$	0.0028	0.45
	Ice	$k = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3}T + 1.0154 \times 10^{-4}T^2$	0.0079	0.79

Tabla 25. Dimensionado y selección de agitadores.

532

AGITACIÓN

Tipo de rodete	$\frac{D_i}{D_t}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	Hojas cort. N.º w/D _i	N.º	Ref.	Tipo de rodete	$\frac{D_i}{D_t}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	Hojas cort. N.º w/D _i	N.º	Ref.	
Turbina de 6 palas planas  $0,25D_t$	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,17	1	7	Dos paletas  $0,25D_t$	4,35	4,3	0,29	3 0,11	8	3	
Igual que en el n.º 1	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,10	2	7	Cuatro paletas. Ver n.º 8	3	3	0,5	0	16	2	
Igual que en el n.º 1	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,04	4	7	Dos paletas. Ver n.º 8	3	3,2	0,33	0	20	4	
Igual que en el n.º 1; $a = 1, b = 40$	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		14*	7	Dos paletas. Ver n.º 8	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,10	10	7
Turbina de 6 palas curvadas Tam. de palas como en n.º 1 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,10	3	7	Dos paletas. Ver n.º 8 Ancho de paleta = $0,13 D_i$	1,1	0,5	0,19	0	29	10	
Turbina 6 palas forma flecha Tam. de pala como en n.º 1 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,10	5	7	Dos paletas. Ver n.º 8 Ancho de paleta = $0,17 D_i$	1,1	0,4	0,10	0	29	10	
Turbina radial con anillo deflector 				0		7	9	Hélice de 3 palas Paso de la hélice = $2 D_i$ 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,10	15	7
Turbina cerrada, de 6 palas. Anillo deflector de 20 hojas	2,4	0,74	0,9	0		11	6	Igual que el n.º 15; $a = 1,7, b = 18$	3,3	2,7-3,9	0,75-1,3	0	21*	7
Semejante, mas no idéntica a la n.º 11	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		12	7	Igual que el n.º 15, pero con paso = $1,33 D_i$	16			3 0,06	18	5
Igual que la 12, pero sin anillo deflector.	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,10		13	7	Igual que el n.º 15, pero con paso = $1,09 D_i$	9,6			3 0,06	23	5
Turbina axial de 8 palas con ángulo de 45°. Ver. n.º 17 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,10		9	7	Igual que el n.º 15, pero con paso = $1,05 D_i, a = 2,3, b = 18$	2,7	2,7-3,9	0,75-1,3	0	27*	7
Turbina axial 4 palas con ángulo de 60° 	3	3	0,50	0		17	2	Igual que el n.º 15, pero con paso = $1,04 D_i, a = 0, b = 18$	4,5	2,7-3,9	0,75-1,3	0	25*	7
Turbina axial de 4 palas con ángulo de 45°. Ver n.º 17.	5,2	5,2	0,87	0		19	2	Igual que el n.º 15, pero con paso = D_i	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4 0,10	24	7
Igual que la n.º 19	2,4-3,0	2,4-3,0	0,4-0,5	0		22	2	Igual que el n.º 15, pero con paso = $D_i; a = 2,1, b = 18$	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0	26*	7
Disco con 16 paletas  $0,1D_t$  $0,35D_t$	2,5	2,5	0,75	4 0,25		6	1	Igual que el n.º 15, pero con paso = D_i	3,8	3,5	1,0	0	28	8

D_t = diámetro del rodete; D_i = diámetro del depósito; n = n.° de revoluciones por segundo; w = ancho de las hojas del cortacorrientes; Z_i = altura a que está el rodete sobre el fondo del depósito; Z_t = altura del nivel del líquido en el depósito.

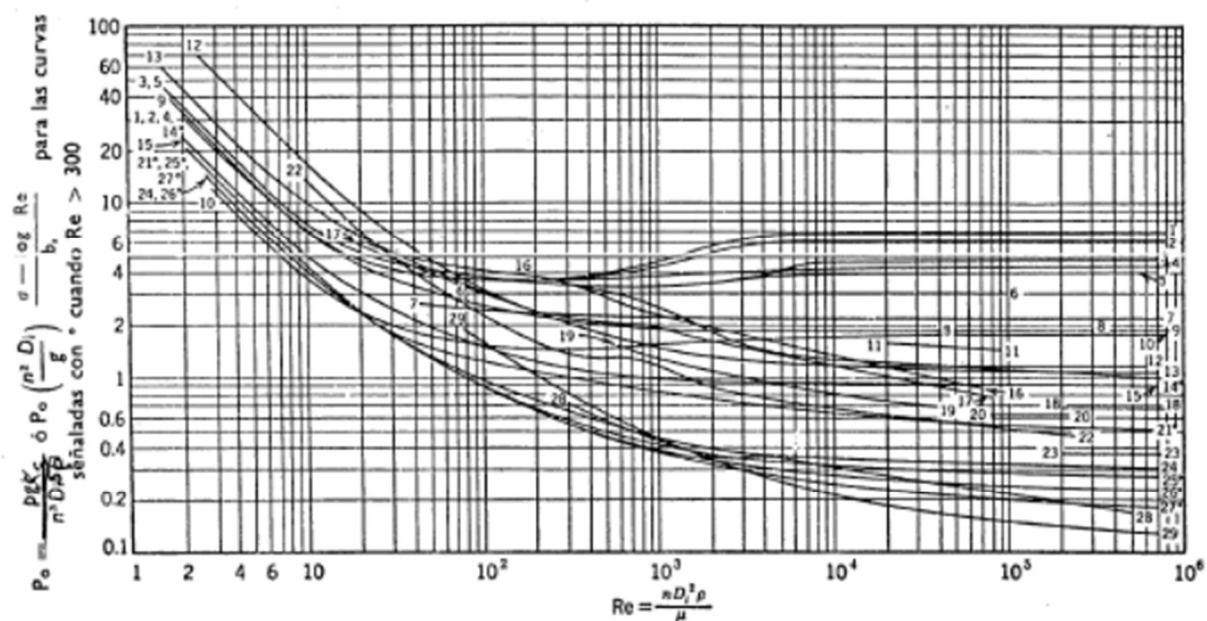


FIG. 477. Consumo de energía de diversos agitadores, expresado por el parámetro de potencia, P_o , y del número de Reynolds, Re . Para las curvas señaladas con *, la influencia de la superficie libre es considerable, por lo que se ha tenido en cuenta el número de Froude, $Fr = g/n^2 D_i$, para Re superiores a 300.

Figura 28. Dimensionado y selección de agitadores.

Tabla 26. Dimensionado y selección para separador centrífugo. [82]

Type	Approximate efficiency (%)	Normal operating range Q , m^3/h at Q/Σ m/s
Tubular bowl	90	0.4 at 5×10^{-8} to 4 at 3.5×10^{-7}
Disc	45	0.1 at 7×10^{-8} to 110 at 4.5×10^{-7}
Solid bowl (scroll discharge)	60	0.7 at 1.5×10^{-6} to 15 at 1.5×10^{-5}
Solid bowl (basket)	75	0.4 at 5×10^{-6} to 4 at 1.5×10^{-4}

ANEXO D. HOJAS DE ESPECIFICACIONES

SILO DE ALMACENAMIENTO	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: TK-101
Material: Acero inoxidable AISI 304	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: GEA Vcool	Posición: Vertical
Descripción: Almacenamiento de leche cruda al aire libre	
Tipo: Recipiente cilíndrico con agitador	Línea: 1/2/3
DATOS DE DISEÑO	
Capacidad (L)	40.000
Peso sin alcoba (kg)	2.974
DIÁMETRO (mm)	3.000
ALTURA ÚTIL (mm)	5.660
DATOS DE OPERACIÓN	
Fluido de proceso	Leche cruda
Fluido de servicio	Agua de refrigeración
Temperatura de entrada (°C)	6
Densidad (kg/m3)	1030
Viscosidad (cP)	3,25
Calor intercambiado (kW)	0,82
DISEÑO DE SERPENTÍN	
Material: Acero inoxidable AISI 304	Cantidad: 1
Diámetro del serpentín (mm)	48,50
Área superficial (m2)	1,03
Longitud (m)	6,74
DISEÑO DE AGITADOR	
Material: Acero inoxidable AISI 304	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval ALS	Posición: Horizontal
Diámetro del agitador (mm)	1.500
Velocidad de giro (rpm)	30
Número de potencia (Np)	0,5
Potencia (W)	48,9

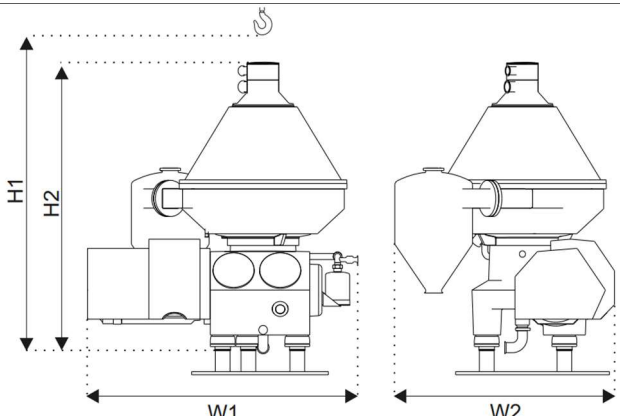
INTERCAMBIADOR DE CALOR		
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: E-101	
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval Frontline M10	Tipo: Placas	
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1	
Descripción: Intercambiador encargado del calentamiento-enfriamiento regenerativo primero leche estéril (UHT)		
DATOS DE OPERACIÓN		
Fluido	Agua caliente	Leche cruda
Caudal másico (kg/h)	20500	20497
Densidad (kg/m³)	985	1025
Temperatura de entrada (°C)	75	6
Temperatura de salida (°C)	65	70
Presión de entrada (bar)	2,5	2
Presión de salida (bar)	2	1,5
Conductividad térmica (W/mK)	0,67	0,59
Calor específico (kJ/kgK)	4,19	3,85
Viscosidad (cP)	0,35	1,5
Velocidad de la corriente (m/s)	0,5	0,4
Coefficiente de película (W/m²K)	4500	3500
Factor de ensuciamiento (m²K/W)	0,0001	0,0002
DIMENSIONADO	VALORES FÍSICOS	
Número total de placas	105	
Área efectiva por placa (m2)	0,62	
Área total de intercambio (m2)	64,77	
Espesor de la placa (mm)	0,6	
Dimensiones de placa (ancho x alto mm)	400 x 1200	
Disposición de pasos (Caliente/Frío)	01-ene	
DTLM (°C)	8,5	
Coefficiente global (W/m²K)	3800	
Calor intercambiado (kW)	1404	

INTERCAMBIADOR DE CALOR		
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: E-102	
Fabricante y modelo comercial: JBT Sterideal DR	Tipo: Tubular	
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1	
Descripción: Intercambiador encargado del calentamiento-enfriamiento regenerativo primero leche estéril (UHT)		
DATOS DE OPERACIÓN		
	CARCASA	TUBOS
Fluido	Leche caliente	Leche fría
Caudal másico (kg/h)	20419,2	20419,2
Densidad (kg/m³)	991,1	998,6
Temperatura de entrada (°C)	108,6	69
Temperatura de salida (°C)	78,33	95
Presión de entrada (bar)	4,5	3
Presión de salida (bar)	4,2	3,3
Conductividad térmica (W/mK)	0,6242	0,6181
Calor específico (kJ/kgK)	3,932	3,922
Viscosidad (cP)	0,34	0,43
Velocidad de la corriente (m/s)	1,253	2,172
Coefficiente de película (W/m²K)	7558	11540
Factor de ensuciamiento (m²K/W)	0,0001	0,0002
DIMENSIONADO	VALORES FÍSICOS	
Diámetro externo tubos (mm)	16	
Espesor de pared tubos (mm)	1,2	
Número de tubos	12 (Por módulo)	
Diámetro carcasa (mm)	85 (Exterior) / 81 (Interior)	
Longitud requerida tubos (m)	60 (Total) / 6 (Por módulo)	
Área de intercambio (m²)	39,3	
DTLM (°C)	11,19	
Coefficiente global de transferencia (W/m²K)	1524	
Calor intercambiado (kW)	670	

INTERCAMBIADOR DE CALOR		
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: E-103	
Fabricante y modelo comercial: JBT Sterideal DR	Tipo: Tubular	
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1	
Descripción: Intercambiador encargado del calentamiento-enfriamiento regenerativo segundo de leche estéril (UHT)		
DATOS DE OPERACIÓN		
	CARCASA	TUBOS
Fluido	Leche caliente	Leche fría
Caudal másico (kg/h)	20419,2	20419,2
Densidad (kg/m³)	967,1	980,6
Temperatura de entrada (°C)	139	95
Temperatura de salida (°C)	108,6	121
Presión de entrada (bar)	4	4,5
Presión de salida (bar)	3,7	4,8
Conductividad térmica (W/mK)	0,6334	0,6304
Calor específico (kJ/kgK)	3,964	3,946
Viscosidad (cP)	1,08	1,28
Velocidad de la corriente (m/s)	1,284	2,212
Coefficiente de película (W/m²K)	4300	7585
Factor de ensuciamiento (m²K/W)	0,0001	0,0002
DIMENSIONADO	VALORES FÍSICOS	
Diámetro externo tubos (mm)	16	
Espesor de pared tubos (mm)	1,2	
Número de tubos	12 (Por módulo)	
Diámetro carcasa (mm)	85 (Exterior) / 81 (Interior)	
Longitud requerida tubos (m)	42 (Total) / 6 (Por módulo)	
Área de intercambio (m²)	35,15	
DTLM (°C)	15,59	
Coefficiente global de transferencia (W/m²K)	1235	
Calor intercambiado (kW)	677	

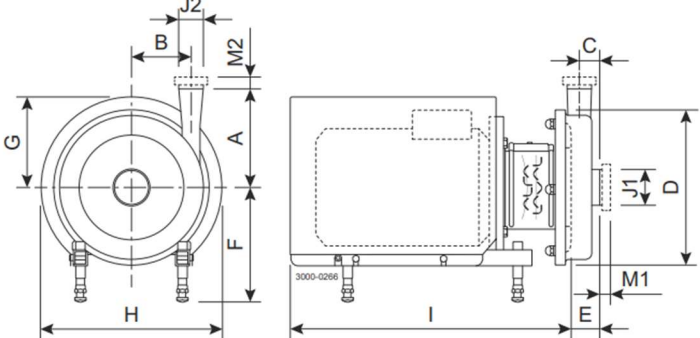
INTERCAMBIADOR DE CALOR		
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: E-104	
Fabricante y modelo comercial: Tetrapak tubular CM	Tipo: Tubular	
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1	
Descripción: Intercambiador encargado del calentamiento de leche estéril (UHT)		
DATOS DE OPERACIÓN		
	CARCASA	TUBOS
Fluido	Agua Sobrecalentada	Leche estandarizada
Caudal másico (kg/h)	16059,6	20419,2
Densidad (kg/m³)	931,1	962,2
Temperatura de entrada (°C)	145	121
Temperatura de salida (°C)	124	139
Presión de entrada (bar)	5	4,2
Presión de salida (bar)	4,8	4
Conductividad térmica (W/mK)	0,683	0,6353
Calor específico (kJ/kgK)	4,27	3,97
Viscosidad (cP)	0,165	0,205
Velocidad de la corriente (m/s)	1,025	2,136
Coefficiente de película (W/m²K)	8506	16567
Factor de ensuciamiento (m²K/W)	0,0001	0,001
DIMENSIONADO	VALORES FÍSICOS	
Diámetro externo tubos (mm)	16	
Espesor de pared tubos (mm)	1,2	
Número de tubos	19 (Por módulo)	
Diámetro carcasa (mm)	108 (Exterior) / 104 (Interior)	
Longitud requerida tubos (m)	108,3 (Total) / 6 (Por módulo)	
Área de intercambio (m²)	103,4	
DTLM (°C)	6	
Coefficiente global de transferencia (W/m²K)	644,4	
Calor intercambiado (kW)	400	

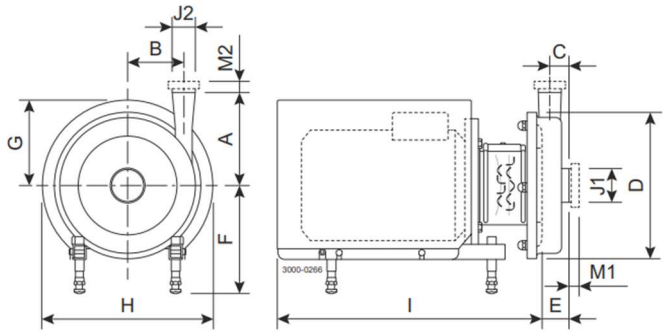
INTERCAMBIADOR DE CALOR		
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: E-105	
Fabricante y modelo comercial: Tetrapak tubular CM	Tipo: Tubular	
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1	
Descripción: Intercambiador encargado del enfriamiento final de leche estéril (UHT)		
DATOS DE OPERACIÓN		
	CARCASA	TUBOS
Fluido	Agua Fría	Leche estandarizada
Caudal másico (kg/h)	99612	20419,2
Densidad (kg/m³)	999,1	1014
Temperatura de entrada (°C)	10	78
Temperatura de salida (°C)	20	25
Presión de entrada (bar)	3	6
Presión de salida (bar)	2,5	5,5
Conductividad térmica (W/mK)	0,5888	0,594
Calor específico (kJ/kgK)	4,188	3,9
Viscosidad (cP)	1,138	0,8459
Velocidad de la corriente (m/s)	5,925	2,026
Coefficiente de película (W/m²K)	16119	7386
Factor de ensuciamiento (m²K/W)	0,0001	0,0002
DIMENSIONADO	VALORES FÍSICOS	
Diámetro externo tubos (mm)	16	
Espesor de pared tubos (mm)	1,2	
Número de tubos	19 (Por módulo)	
Diámetro carcasa (mm)	108 (Exterior) / 104 (Interior)	
Longitud requerida tubos (m)	24,55 (Total) / 6 (Por módulo)	
Área de intercambio (m²)	23,45	
DTLM (°C)	31,8	
Coefficiente global de transferencia (W/m²K)	1555	
Calor intercambiado (kW)	1159	

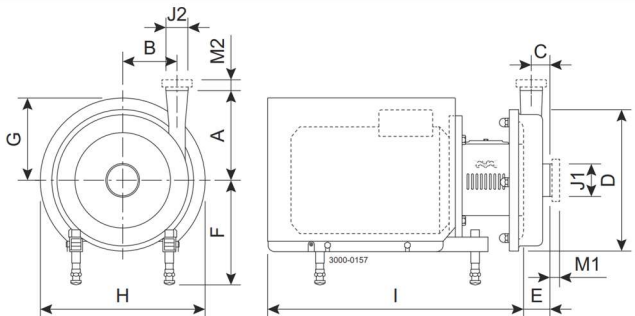
SEPARADOR CENTRÍFUGO (DESNATADORA)	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: CS-101
Material: Acero inoxidable Duplex	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval H530	Posición: Vertical
Descripción: Fraccionamiento de fases (separación de nata) y eliminación de sedimentos/impurezas	
Tipo: Discos troncocónicos	Línea: 1/2/3
DATOS DE OPERACIÓN	
Caudal de proceso (L/h)	20000
Densidad de la leche desnatada (kg/m³)	1025
Densidad de la grasa láctea (kg/m³)	900
Viscosidad dinámica de la leche (cP)	1,2
Diámetro crítico de corte (μm)	2
Fluido de fase continua	Leche desnatada
Fluido de fase dispersa	Glóbulo graso (Nata)
Σ (m²)	27.183
DATOS DE DISEÑO	
Caudal nominal (L/h)	30.000
Potencia del motor instalado (kW)	18,5
Velocidad de rotación del rotor (rpm)	6.500 - 7.500
Entrada del tambor	Hermética
Iniciación de descarga del tambor	Eyección activada por temporizador
Grado de descarga del tambor	Eyección variable
Transmisión	Directa
 Technical drawing of the Alfa Laval H530 centrifugal separator. It shows two views: a front view on the left and a side view on the right. The front view includes dimension lines for H1 (total height), H2 (height to the top of the drum), W1 (width), and W2 (width of the base). The side view shows the profile of the drum and the base. The drawing is a line drawing with dashed lines indicating hidden parts.	
H1 (Altura mínima de elevación): 2.800 mm H2: 1.793 mm W1: 1 742 mm W2: 1.414 mm	

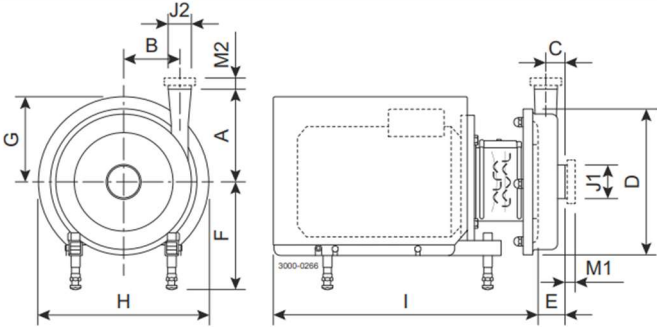
HOMOGENEIZADOR DE ALTA PRESIÓN	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: H-101
Material: Acero inoxidable AISI 304	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: GEA Ariete 3160	Etapas de homogenización: 2
Descripción Disminución del tamaño de los glóbulos	
Número de pistones: 5	Línea: 1
DATOS DE OPERACIÓN	
Caudal de proceso (kg/h)	20.420
Presión primera etapa (bar)	200
Presión segunda etapa (bar)	50
Temperatura de entrada (°C)	60,06
Temperatura de salida (°C)	69,1
Densidad del fluido (kg/m³)	1011
Potencia de trabajo (kW)	138,9
DATOS DE DISEÑO	
Capacidad nominal máxima (L/h)	24000
Viscosidad máxima de diseño (cP)	< 200 cP
Potencia eléctrica instalada (kW)	4

DESAIREADOR POR VACÍO	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: EV-101
Material: Acero inoxidable AISI 304	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval 24-DR	Posición: Vertical
Descripción: Extracción de aire libre y disuelto mediante vacío	
Tipo: Recipiente cilíndrico con condensador integrado	Línea: 1
DATOS DE OPERACIÓN	
Caudal de proceso (L/h)	20000
Temperatura de alimentación (°C)	70
Temperatura de salida (°C)	60,06
Viscosidad (cP)	0,788
Calor cedido por el producto (kW)	217,3
Presión de operación	-0,8 bar (relativa) / 0,2 bar (absoluta)
Fluido de proceso	Leche entera
Fluido de servicio	Agua de refrigeración
DATOS DE DISEÑO	
Capacidad nominal máxima (L/h)	24000
Viscosidad máxima de diseño (cP)	< 200 cP
Potencia eléctrica instalada (kW)	4
LONGITUD (mm)	2500
ANCHURA (mm)	1600
ALTURA (mm)	4700

BOMBA DE TRASIEGO	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: BL-101
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval LKH-5	Posición: Horizontal
Descripción: Traslado continuo y eficiente de fluidos de baja viscosidad	
Tipo: Centrífuga	Línea: 1/2/3
DATOS DE OPERACIÓN	
Caudal másico (kg/s)	5,69
Densidad de la leche (kg/m³)	1034
Hb (m)	5,0
Rendimiento (%)	80
Potencia de trabajo (kW)	0,35
DATOS DE DISEÑO	
Caudal máximo (m³/h)	500
Velocidad min. /máx. del motor (rpm)	9000-4.000
Presión de entrada máx. (bar)	6
Escala de temperatura (°C)	-10°C to +140°C
Diámetro de entrada de la bomba	DN50
Diámetro de salida de la bomba	DN40
Frecuencia (Hz)	60
 A: 158 mm B: 70 mm C:22 mm D: 189 mm E: 42 mm	

BOMBA DE TRASIEGO	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: BL-102
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval LKH-10	Posición: Horizontal
Descripción: Traslado continuo y eficiente de fluidos de baja viscosidad	
Tipo: Centrífuga	Línea: 1/2/3
DATOS DE OPERACIÓN	
Caudal másico (kg/s)	5,68
Densidad de la leche (kg/m³)	1012
Hb (m)	20,1
Rendimiento (%)	80
Potencia de trabajo (kW)	1,40
DATOS DE DISEÑO	
Caudal máximo (m³/h)	500
Velocidad min. /máx. del motor (rpm)	9000-4.000
Presión de entrada máx. (bar)	6
Escala de temperatura (°C)	-10°C to +140°C
Diámetro de entrada de la bomba	DN65
Diámetro de salida de la bomba	DN50
Frecuencia (Hz)	50
 A: 142 mm B: 87 mm C: 23 mm D: 247 mm E: 51 mm	

BOMBA DE TRASIEGO	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: BL-103
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval LKHPF-60	Posición: Horizontal
Descripción: Traslado continuo y eficiente de fluidos de baja viscosidad	
Tipo: Centrífuga	Línea: 1/2/3
DATOS DE OPERACIÓN	
Caudal másico (kg/s)	5,68
Densidad de la leche (kg/m3)	1016
Hb	471,6
Rendimiento (%)	80
Potencia de trabajo (kW)	32,8
DATOS DE DISEÑO	
Caudal máximo (m3/h)	280
Velocidad min. /máx. del motor (rpm)	9000-4.000
Presión de entrada máx. (bar)	40
Escala de temperatura (°C)	-10 °C a +140 °C
Diámetro de entrada de la bomba	DN150
Diámetro de salida de la bomba	DN100
Frecuencia (Hz)	50
 A: 262 mm B: 102 mm C: 42 mm D: 329 mm E: 93 mm	

BOMBA DE TRASIEGO	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: BL-104
Material: Acero inoxidable AISI 316L	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval LKH-5	Posición: Horizontal
Descripción: Traslado continuo y eficiente de fluidos de baja viscosidad	
Tipo: Centrífuga	Línea: 1/2/3
DATOS DE OPERACIÓN	
Caudal másico (kg/s)	5,69
Densidad de la leche (kg/m³)	1034
Hb (m)	0,0
Rendimiento (%)	80
Potencia de trabajo (kW)	0,00
DATOS DE DISEÑO	
Caudal máximo (m³/h)	500
Velocidad min. /máx. del motor (rpm)	9000-4.000
Presión de entrada máx. (bar)	6
Escala de temperatura (°C)	-10°C to +140°C
Diámetro de entrada de la bomba	DN50
Diámetro de salida de la bomba	DN40
Frecuencia (Hz)	60
 A: 158 mm B: 70 mm C: 22 mm D: 189 mm E: 42 mm	

TANQUE ASEPTICO	
Proyecto: Planta de producción de leche sin lactosa	Nomenclatura: AT-101
Material: Acero inoxidable AISI 304	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Tetra Pak Alsafe	Posición: Vertical
Descripción: Tanque vertical de almacenamiento con camisa de refrigeración cilíndrica	
Tipo: Recipiente esterilizado	Línea: 1/2/3
DATOS DE OPERACIÓN	
Fluido de proceso	Leche esterilizada
Fluido de servicio	Agua de refrigeración
Temperatura de entrada (°C)	6
Densidad (kg/m³)	1025
Viscosidad (Pa·s)	0,00175
Calor intercambiado (kW)	0,18
DATOS DE DISEÑO	
Capacidad (L)	40.000
Máxima presión de trajo (bar)	3
Peso neto (kg)	9.100
Peso bruto (kg)	11.150
DIÁMETRO (mm)	3.000
Presión máxima de trabajo (bar)	3
DISEÑO DE AGITADOR	
Material: Acero inoxidable AISI 304	Cantidad: 1
Fabricante y modelo comercial: Alfa Laval ALS	Posición: Vertical
Diámetro del agitador (mm)	1.000
Velocidad de giro (rpm)	30
Número de potencia (Np)	0,5
Potencia (W)	64,1
 A: 3600 mm B: 7600 mm	

ANEXO E. ANÁLISIS ECONÓMICO

Tabla 27. Factores de Lang modificados por Peter y Timmerhaus en plantas de proceso: sólido, semifluido y fluido

Ítem	Tipos de proceso		
	Sólidos	Semifluidos	Fluidos
A. Costo directo			
A.1 Equipo comprado	100	100	100
A.2 Instalación de equipo	45	39	47
A.3 Instrumentos y control (instalados)	9	13	18
A.4 Tuberías (instalados)	16	31	66
A.5 Eléctricos (instalados)	10	10	11
A.6 Edificios (incluye servicios)	25	29	18
A.7 Mejoras del terreno	13	10	10
A.8 Servicios auxiliares (instalados)	40	55	70
A.9 Terreno	6	6	6
Total directos	264	293	346
B. Costo indirecto			
B.1 Ingeniería de supervisión	33	32	33
B.2 Gastos de construcción	39	34	41
B.3 Contratista	17	18	21
B.4 Contingentes	34	36	42
Total indirectos	123	120	137
Capital fijo para la inversión (A+B)	387	413	483
C. Capital de trabajo	68	74	86
Inversión total (A+B+C)	455	487	569

Tabla 28. Factores de Chilton para el coste total de operación de la planta

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		

Tabla 29. Estimación de números de operarios en función del equipamiento.

Item	Costes	Valores típicos	Item	Costes	Valores típicos
C ₁	Materias primas	Datos del diagrama del proceso	C ₈	Supervisión	$C_8 = f_8 \cdot C_6$ f_8 : 20 %
C ₂	Electricidad, vapor, agua	Según diagrama de proceso (Tabla 10)	C ₉	Dirección en planta	$C_9 = f_9 \cdot C_6$ f_9 : 50 %
C ₃	Mantenimiento	$C_3 = f_3 \cdot CTF$ f_3 : 5- 10 %	C ₁₀	Cargas de capital	$C_{10} = f_{10} \cdot CTF$ f_{10} : 15%
C ₄	Materiales Auxiliares	$C_4 = f_4 \cdot C_3$ f_4 : 100 %	C ₁₁	Seguros	$C_{11} = f_{11} \cdot CTF$ f_{11} : 1%
C ₅	Empaquetado y envío	Despreciable	C ₁₂	Impuestos locales	$C_{12} = f_{12} \cdot CTF$ f_{12} : 2%
C ₆	Mano de obra directa (MOD)	Según estimaciones (Tabla 11)	C ₁₃	Royalties	$C_{13} = f_{13} \cdot CTF$ f_{13} : 1%
C ₇	Costes de laboratorio	$C_7 = f_7 \cdot C_5$ f_7 : 20 %	C ₁₄	Coste de Producción Directo (CPD)	$C_{14} = \sum_{i=1}^{13} C_i$

Tabla 30. Estimación de los Flujos Netos de Caja (FNC) del proyecto para el análisis de viabilidad financiera.

Año	Inversión	Ventas	Costes	Depreciación	BAI	Impuestos	Beneficio Neto	FNC
0	-30.228.064,00 €							-30.228.064,00 €
1	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
2	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
3	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
4	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
5	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
6	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
7	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
8	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
9	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
10	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
11	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
12	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
13	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
14	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €
15	-	133.382.700,00 €	122.809.544,02 €	2.015.204,27 €	8.557.951,71 €	2.139.487,93 €	6.418.463,78 €	8.433.668,05 €

REFERENCIAS

- [1] N. Silanikove, G. Leitner, y U. Merin, «The Interrelationships between Lactose Intolerance and the Modern Dairy Industry: Global Perspectives in Evolutional and Historical Backgrounds», *Nutrients*, vol. 7, n.º 9, pp. 7312-7331, ago. 2015, doi: 10.3390/nu7095340.
- [2] Ministrio de la Presidencia, *Real Decreto 1679/1994, de 22 de julio, por el que se establece las condiciones sanitarias aplicables a la producción y comercialización de leche cruda, leche tratada térmicamente y productos lácteos*. 1994, pp. 29492-29511. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1994/07/22/1679>
- [3] Orteg a Anta, Rosa M., Lorenzo Mora, Ana M., y Salas González, María Dolores, «Valor nutricional de los productos lácteos y recomendaciones de consumo», en *El sector lácteo en España*, Cajamar Caja Rural, 2022.
- [4] Hernández-Ruiz, Ángela, Soto-Méndez, María José, Gil, Ángel, Juárez, Manuela, y Fontecha, Javier, «Lácteos y salud», en *El sector lácteo en España*, Cajamar Caja Rural, 2022.
- [5] Ignaci o Elola y Organización Interprofesional Láctea (InLac), «Organización y vertebración de la cadena de valor El papel de la InLac», en *El sector lácteo en España*, Cajamar Caja Rural, 2022.
- [6] B. Gösta, *Dairy processing handbook*. en Tetra Pak Processing Systems AB. Lund, Sweden: Teknotext AB, 1995.
- [7] E. Muehlhoff, A. Bennett, y D. McMahon, *Milk and dairy products in human nutrition*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3396e/i3396e.pdf>
- [8] D. G. A. Zúniga, «Intolerancia a la Lactosa», n.º 3.
- [9] V. R. Preedy, Ed., «Dietary Sugars Chemistry, Analysis, Function and Effects», en *Food and Nutritional Components in Focus*, King's College London, UK: Royal Society of Chemistry, 2012, pp. P001-P004. doi: 10.1039/9781849734929-FP001.
- [10] Rubén Bartolomé Perea, «Diseño y dimensionamiento de una industria láctea elaboradora de leche pasteurizada mediante campos eléctricos pulsados con capacidad para 20.000 L de leche/día Alcobendas», Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2023.
- [11] ADIL AC, «Diferencias entre la IL y la malabsorción», Lactosa. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://lactosa.org/diferencias-entre-la-il-y-la-malabsorcion/>
- [12] P. L. H. McSweeney, J. A. O'Mahony, y A. L. Kelly, Eds., *Advanced Dairy Chemistry: Volume 3: Lactose, Water, Salts and Minor Constituents*. Cham: Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-92585-7.
- [13] PULE

VA, «Beneficios de la leche sin lactosa». [En línea]. Disponible en: <https://www.lechepuleva.es/blog/leche-sin-lactosa/>

[14] J. G. Ruiz Sánchez, S. Palma Milla, B. Pelegrina Cortés, B. López Plaza, L. M. Bermejo López, y C. Gómez-Candela, «UNA VISIÓN GLOBAL DE LAS REACCIONES ADVERSAS A ALIMENTOS: ALERGIA E INTOLERANCIA ALIMENTARIA», *Nutr. Hosp.*, vol. 35, n.º 4, jun. 2018, doi: 10.20960/nh.2134.

[15] Shutterstock, «Intolerancia a la lactosa y digestión normal de la lactosa [Ilustración vectorial]». 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.shutterstock.com/image-vector/lactose-intolerance-normal-digestion-condition-which-1278421840>

[16] D. M. Swallow, «Genetics of Lactase Persistence and Lactose Intolerance», *Annu. Rev. Genet.*, vol. 37, n.º 1, pp. 197-219, dic. 2003, doi: 10.1146/annurev.genet.37.110801.143820.

[17] R. Mattar, Mazo, y Carrilho, «Lactose intolerance: diagnosis, genetic, and clinical factors», *Clin. Exp. Gastroenterol.*, p. 113, jul. 2012, doi: 10.2147/CEG.S32368.

[18] EFSA, «Scientific Opinion on lactose thresholds in lactose intolerance and galactosaemia», *EFSA J.*, n.º 2010; 8(9):1777, 2010, doi: 10.2903/j.efsa.2010.1777.

[19] P. Walstra, *Dairy Technology: Principles of Milk Properties and Processes*, 0 ed. CRC Press, 1999. doi: 10.1201/9780824746414.

[20] Raph Early, *Tecnología de los productos lácteos*. Acribia.

[21] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, *Reglamento (CE) nº 178/2002 por el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan procedimientos relativos a la seguridad alimentaria*. 2002. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2002-80201>

[22] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, *Reglamento (CE) nº 852/2004 relativo a la higiene de los productos alimenticios*. 2004. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2004-81035>

[23] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, *Reglamento (CE) nº 853/2004, por el que se establecen normas específicas de higiene de los alimentos de origen animal*. 2004. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2004-81036>

[24] European Parliament and of the Council, *Regulation (EC) No 854/2004 laying down specific rules for the organisation of official controls on products of animal origin intended for human consumption*, vol. 139. 2004. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2004/854/oj>

[25] Regul

ation (EU) 2017/625 of the European Parliament and of the Council of 15 March 2017 on official controls and other official activities performed to ensure the application of food and feed law, rules on animal health and welfare, plant health and plant protection products, amending Regulations (EC) No 999/2001, (EC) No 396/2005, (EC) No 1069/2009, (EC) No 1107/2009, (EU) No 1151/2012, (EU) No 652/2014, (EU) 2016/429 and (EU) 2016/2031 of the European Parliament and of the Council, Council Regulations (EC) No 1/2005 and (EC) No 1099/2009 and Council Directives 98/58/EC, 1999/74/EC, 2007/43/EC, 2008/119/EC and 2008/120/EC, and repealing Regulations (EC) No 854/2004 and (EC) No 882/2004 of the European Parliament and of the Council, Council Directives 89/608/EEC, 89/662/EEC, 90/425/EEC, 91/496/EEC, 96/23/EC, 96/93/EC and 97/78/EC and Council Decision 92/438/EEC (Official Controls Regulation) (Text with EEA relevance), vol. 095. 2017. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://data.europa.eu/eli/reg/2017/625/oj>

[26]

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, *Real Decreto 989/2022, de 29 de noviembre, por el que se establecen normas básicas para el registro de los agentes del sector lácteo, movimientos de la leche y el control en el ámbito de la producción primaria y hasta la primera descarga.*

[27]

Ministerio de la Presidencia, *Real Decreto 1054/2003, de 1 de agosto, por el que se aprueba la Norma de calidad para determinados tipos de leche conservada parcial o totalmente deshidratada destinados a la alimentación humana.* 2003. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-15483>

[28]

Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática, «*Real Decreto 1021/2022, de 13 de diciembre, por el que se regulan determinados requisitos en materia de higiene de la producción y comercialización de los productos alimenticios en establecimientos de comercio al por menor.*» Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-21681>

[29]

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, *Reglamento n.º 1169/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de octubre de 2011.* 2011, pp. 18-63.

[30]

Gobierno de España, *Real Decreto 126/2015, de 27 de febrero, por el que se aprueba la norma general relativa a la información alimentaria de los alimentos que se presenten sin envasar para la venta al consumidor final y a las colectividades, de los envasados en los lugares de venta a petición del comprador, y de los envasados por los titulares del comercio al por menor.* 2015, pp. 20059-20066.

[31]

AESA, «NOTA SOBRE EL EMPLEO DE LAS MENCIONES “SIN GLUTEN” Y “SIN LACTOSA” EN EL ETIQUETADO, PRESENTACIÓN Y PUBLICIDAD DE LOS ALIMENTOS», España, 2011.

[32]

«REGlamento DE EJECUCIÓN (UE) No 828/2014 DE LA COMISIÓN - de 30 de julio de 2014 - relativo a los requisitos para la transmisión de información a los consumidores sobre la ausencia o la presencia reducida de gluten en los alimentos -».

[33]

Adilana, «Límites a Nivel Mundial». 2026.

[34]

AESA

N, *CONDICIONES DE EMPLEO DE LAS MENCIONES “SIN LACTOSA” Y “BAJO CONTENIDO EN LACTOSA”*.

[35]

Minist

erio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, *Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación*. 2016. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2016-12601>

[36]

Minist

erio de Medio Ambiente, *Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas*. 2001. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-14276>

[37]

Minist

erio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, *Real Decreto 1042/2017, de 22 de diciembre, sobre la limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión medianas y por el que se actualiza el anexo IV de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera*. 2017. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-15368>

[38]

Jefatu

ra del Estado, *Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*. 2022. Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5809>

[39]

FAO,

World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2025. FAO, 2025. doi: 10.4060/cd4313en.

[40]

Tetra

Pak®, «Leche blanca UHT». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.tetrapak.com/es-ve/solutions/categories/dairy/white-milk/uht-milk>

[41]

Minist

erio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, «CONSUMO DE LECHE Y PRODUCTOS LÁCTEOS». 2023.

[42]

P. J.

T. Dekker, D. Koenders, y M. J. Bruins, «Lactose-Free Dairy Products: Market Developments, Production, Nutrition and Health Benefits», *Nutrients*, vol. 11, n.º 3, p. 551, mar. 2019, doi: 10.3390/nu11030551.

[43]

«1 de

cada 4 consumidores españoles consumen productos sin lactosa Consumidora», Consumidora. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaalimentaria.es/consumidora/alimentacion-mujer/1-de-cada-4-consumidores-espanoles-consumen-productos-sin-lactosa>

[44]

The

Business Research Company, «Lactose-Free Dairy Market Report 2026, Size And Industry Trends». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/lactose-free-dairy-global-market-report>

[45]

Globa

l Growth Insights, «Informe de investigación del tamaño del mercado de leche UHT 2026-2035». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.globalgrowthinsights.com/es/market-reports/uht-milk-market-114347>

- [46] A. Li *et al.*, «Advances in Low-Lactose/Lactose-Free Dairy Products and Their Production», *Foods*, vol. 12, n.º 13, p. 2553, jun. 2023, doi: 10.3390/foods12132553.
- [47] «Adilac», Lactosa. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://lactosa.org/>
- [48] J. S. Ramírez, C. A. Solís, C. A. Vélez, J. S. Ramírez, C. A. Solís, y C. A. Vélez, «Tecnología de membranas: Obtención de proteínas de lactosuero», *Entre Cienc. E Ing.*, vol. 12, n.º 24, pp. 52-59, dic. 2018, doi: 10.31908/19098367.3815.
- [49] M. Paques y C. Lindner, Eds., *Lactose: evolutionary role, health effects, and applications*. London, United Kingdom ; San Diego, CA, United States: Elsevier/Academic Press, 2019.
- [50] «Soluciones de filtración para leche». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.tetrapak.com/es-es/solutions/integrated-solutions-equipment/processing-equipment/membrane-filtration/liquid-milk>
- [51] «Applications», Theway Membranes. Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.thewaymembranes.com/es/industrial-process-1>
- [52] A. Bosso, L. R. I. Morioka, L. F. D. Santos, y H. H. Suguimoto, «Lactose hydrolysis potential and thermal stability of commercial β -galactosidase in UHT and skimmed milk», *Food Sci. Technol.*, vol. 36, n.º 1, pp. 159-165, mar. 2016, doi: 10.1590/1678-457X.0085.
- [53] P. Singh, P. S. Rao, V. Sharma, y S. Arora, «Physico-chemical aspects of lactose hydrolysed milk system along with detection and mitigation of maillard reaction products», *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 107, pp. 57-67, ene. 2021, doi: 10.1016/j.tifs.2020.11.030.
- [54] «LACTOSE-FREE DAIRY PRODUCTS | Dairy Processing Handbook». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/chapter/lactose-free-dairy-products>
- [55] J. Lucas Vallejo-García *et al.*, «Hydrolysis of Lactose: Conventional Techniques and Enzyme Immobilization Strategies on Polymeric Supports», en *Food Science and Nutrition*, vol. 7, J. Chandrapala, Ed., IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1005087.
- [56] «Maillard Reaction - an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/food-science/maillard-reaction>
- [57] «Deaeration - an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/deaeration>
- [58] «Centrifugal separators and milk standardization | Dairy Processing Handbook». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/chapter/centrifugal-separators-and-milk-standardization>

- [59] «LON G-LIFE DAIRY PRODUCTS | Dairy Processing Handbook». Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://dairyprocessinghandbook.tetrapak.com/chapter/long-life-dairy-products>
- [60] Ordóñez Pereda, Juan Antonio, *Tecnología de los alimentos. Volumen I: Componentes de los alimentos y procesos*. Madrid: Síntesis, 2010.
- [61] «Camiones cisterna de transporte de leche». Accedido: 18 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://clw-groups.com/es/product/dairy-milk-transportation-trucks-tank/>
- [62] «Intercambiador de Calor de Placas (PHE) Explicado - saVRee - saVRee». Accedido: 19 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://savree.com/es/enciclopedia/intercambiador-de-calor-de-placas-phe>
- [63] «A Series». Accedido: 19 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.alfalaval.us/products/separation/centrifugal-separators/separators/dairy/a-series/>
- [64] «Flash evaporation», *Wikipedia*. 26 de noviembre de 2025. Accedido: 19 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Flash_evaporation&oldid=1324274038
- [65] «Tetra Pak® Tubular Heat Exchanger with P2P technology». Accedido: 20 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.tetrapak.com/solutions/integrated-solutions-equipment/processing-equipment/heat-transfer/tetra-pak-tubular-heat-exchanger/tetra-pak-tubular-heat-exchanger-with-p2p-technology>
- [66] «Milk Holding Tube Manufacturer from Pune», IndiaMART.com. Accedido: 20 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.indiamart.com/swara-equipment-pune/>
- [67] Zagip Mustafina, «Relationship between food shelf life and environmental impact of Tetra Pak packages», Master Thesis, Faculty of Engineering LTH, Lund University, P.O. Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden, 2023.
- [68] Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL), «Prevención de la contaminación en la industria láctea», Plan de Acción para el Mediterráneo, Manual técnico, may 2002.
- [69] «Ley 7/2022 de residuos, suelos contaminados y economía circular», Pacto Mundial. Accedido: 21 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.pactomundial.org/leyes-directivas-normativas-sostenibilidad/ley-7-2022-de-residuos-y-suelos-contaminados-para-una-economia-circular/>
- [70] K. Bella y P. V. Rao, «Anaerobic digestion of dairy wastewater: effect of different parameters and co-digestion options—a review», *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 13, n.º 4, pp. 2527-2552, feb. 2023, doi: 10.1007/s13399-020-01247-2.
- [71] J. Estornell, «Sistemas de limpiezas CIP en la industria láctea», Christeyns. Accedido: 21 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.christeyns.com/es-es/sistemas-de-limpiezas-cip-en-la-industria-lactea/>

[72]

«Tratamiento previo de aguas residuales de lecherías antes de su vertido al alcantarillado - ALMAWATECH». Accedido: 21 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.almawatech.com/es/ingenieria_y_optimizacion_de_plantas/vorbehandlung-von-molkereiabwasser-vor-der-einleitung-in-die-kanalisation/

[73]

JMDe sign, «Sistema DAF para tratamiento de aguas residuales», Sigmadaf. Accedido: 21 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://sigmadafclarifiers.com/sistemas-daf-tratamiento-aguas-residuales/>

[74]

M. Ullate, «RV: Consulta técnica para Trabajo de Fin de Grado – Ingeniería de producción de leche UHT sin lactosa».

[75] MAPA, «Informe anual del consumo alimentario en España 2024», España.

[76] Alejandro Martínez Mangas, «Consulta técnica TFG - Datos de mercado y producción de leche sin lactosa», 25 de mayo de 2026.

[77]

MAP A, «Informe mes a mes mayo 2025», MAPA, España, may 2025.

[78]

Choi, Y. y Okos, M. R., «Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods», en *Food Engineering and Process Applications. Vol. 1: Transport Phenomena*, London: Elsevier Applied Science, 1986, pp. 93-101.

[79]

R. N. Goldberg y Y. B. Tewari, «A calorimetric and equilibrium investigation of the hydrolysis of lactose», *J. Biol. Chem.*, vol. 264, n.º 17, pp. 9897-9900, jun. 1989.

[80]

«Agitador Lateral LECOR/LMRE - inoxmim.com». Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.inoxmim.com/producto/agitador-lateral-lecor-lmre/>

[81]

«AGITADORES INDUSTRIALES PARA ALIMENTACIÓN», G&G Ingenieros | Agitadores Industriales en Bilbao. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.agitador.es/fabricantes-de-mezcladores/agitadores-industriales-para-alimentacion/>

[82]

G. P. Towler y R. K. Sinnott, *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*, Third edition. Oxford [England] ; Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann, 2022.

[83]

Alfa Laval, «Intercambiador de calor de placas M6», Suecia, Ficha técnica, 2016.

[84]

Coron el Toro, Juan Francisco, «Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor», Universidad de Sevilla, Dpto. de Ingeniería Energética, Grupo de Termotecnia, Sevilla, España, Documento de trabajo.

[85]

«Quiénes somos | Gemina». Accedido: 3 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.gemina.es/es/quienes-somos>

[86]

«Non-household electricity prices in 2nd half of 2025: -3.5% - News articles - Eurostat». Accedido: 3 de junio de 2026.

[En línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20260508-2>

[87]

Redac

ción, «La CNMC aprueba alza en el precio de los peajes de luz para 2026», Business People. Accedido: 3 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://business-people.es/actualidad/la-cnmc-aprueba-alza-en-el-precio-de-los-peajes-de-luz-para-2026/>

[88]

«MIB

GAS - Mercado Ibérico del Gas». Accedido: 3 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mibgas.es/>

[89]

«2026

- Cánones y tarifas - CHG». Accedido: 3 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.chguadalquivir.es/canones-y-tarifas/-/document_library_display/1f1V6TVYrA63/view/2567472?_110_INSTANCE_1f1V6TVYrA63_topLink=home&_110_INSTANCE_1f1V6TVYrA63_delta2=20&_110_INSTANCE_1f1V6TVYrA63_keywords=&_110_INSTANCE_1f1V6TVYrA63_advancedSearch=false&_110_INSTANCE_1f1V6TVYrA63_andOperator=true&p_r_p_564233524_resetCur=false&_110_INSTANCE_1f1V6TVYrA63_cur2=1

[90]

Área

de Urbanismo, Protección Ambiental, Patrimonio y Ayuntamiento de Sevilla, «Resolución nº 120, de 13 de febrero de 2026», Ayuntamiento de Sevilla, Sevilla, España, Boletín Oficial de la Provincia de Sevilla (BOP), feb. 2026.

[91] Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «DECLARACIONES DE ENTREGAS DE LECHE CRUDA A LOS PRIMEROS COMPRADORES», Subdirección General de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, España, abr. 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/produccion-y-mercados-ganaderos/sectores-ganaderos/vacuno-lechero/>

[92]

«Lact

ase L», ASA Spezialenzyme GmbH. Accedido: 3 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://asa-enzyme.de/en/produkt/lactase-l/>

[93]

R.

Turton, Ed., *Analysis, synthesis, and design of chemical processes*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2012.

[94]

«BOE

-A-2022-5809 Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.» Accedido: 5 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2022-5809>

[95]

G. P.

Towler y R. K. Sinnott, *Chemical engineering design: principles, practice, and economics of plant and process design*, 2nd ed. Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 2013.

GLOSARIO

ADILAC: Asociación de intolerantes a la lactosa España	10, 15
AESAN: Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición	10, 11, 45
AISI: American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero)	31, 35, 64
BAI: Beneficios Antes de Impuestos	75, 76
BN: Beneficio Neto	76
BOE: Boletín Oficial del Estado	3, 69
BOP: Boletín Oficial de la Provincia de Sevilla	69
CE: Comunidad Europea	9, 10
CHG: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir	69
CIP: Cleaning in Place (Limpieza In Situ)	24, 35, 40, 41, 49, 68
CNMC: Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia	
CTI: Coste Total de Inversión	67, 71, 74, 75
CTP: Coste Total de Producción	67, 75
DAF: Dissolved Air Flotation (Flotación por aire disuelto)	41
EDARI: Estación Depuradora de Aguas Residuales Industriales	41
EFSA: European Food and Safety Authority (Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria)	9, 10
EMASESA: Empresa Metropolitana de Abastecimiento y Saneamiento de Aguas de Sevilla S.A.	69
FAO: Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)	13
FENIL: Fundación Nacional de la Industria Láctea	45
FNC: Flujos Netos de Caja	76
HTST: High Temperature Short Time (alta temperatura/corto lapso)	54, 62
LD: Lactase deficiency (Deficiencia de lactasa)	7
LER: Listado Europeo de Residuos	40
LIGN: Lactose Intolerance Global Network	14, 15
LM: Lactose Malabsorption (Malabsorción de lactosa)	7
LNP: Lactase Non-Persistence (No Persistencia de Lactasa)	7
LP: Lactase Persistence (Persistencia de Lactasa)	7
MAPA: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación	14, 45
MIBGAS: Mercado Ibérico del Gas	69
MOD: Mano de Obra Directa	74
NF: Nanofiltración	16
P2P: Product two Product (Producto a Producto)	30, 35
PB: Payback (Periodo de Recuperación de la Inversión)	75
PLC: Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable)	35
RAA: Reacciones Adversas a Alimentos	6
SEPD: Sociedad Española de Patología Digestiva	7
SNG: Sólidos No Grasos	3
TCAC: Tasa de Crecimiento Anual Compuesto	14
TIR: Tasa Interna de Retorno	75
UF: Ultrafiltración	16
UHT: Ultra High Temperature (Ultra alta temperatura)	1, 13, 14, 15, 18, 21, 22, 23, 28, 29, 35, 37, 41, 45, 47, 49, 50, 53, 54, 65, 68
VAN: Valor Actual Neto	75, 76