

Son muchos los pasos andados para llegar hasta aquí.

Por suerte, durante el camino he encontrado siempre el apoyo incondicional de familiares, amigos y profesores de la Escuela. A todos ellos, mi mayor agradecimiento, y de forma especial a mis padres, mis hijos y a mi tutora, la Dra. Rita Puig.

Corpus Moreno

Índice

Índice	2
1 Introducción	5
1.1 Análisis del ciclo de vida	5
1.2 Sector lácteo	8
1.3 Principales componentes de la leche	10
1.4 Caracterización y tipos de yogur	12
2 Definición de objetivos y alcance	15
2.1 Objetivos	15
2.2 Alcance	15
3 Descripción del proceso	18
3.1 Recepción de la leche.....	18
3.2 Preparación o acondicionamiento de la leche.....	20
3.2.1 Normalización del contenido en grasa	20
3.2.2 Normalización del extracto seco magro de la leche	22
3.2.3 Adiciones facultativas.....	23
3.2.4 Homogeneización	24
3.3 Pasteurización	25
3.4 Inoculación.....	26

3.4.1	Características de la microflora esencial.....	27
3.4.2	Producción del cultivo estárter	28
3.4.3	Leche fermentada probiótica.....	29
3.5	Fermentación o incubación	31
3.6	Enfriamiento.....	33
3.7	Yogur firme	33
3.8	Yogur batido.....	34
3.8.1	Enfriamiento en una sola fase.....	35
3.8.2	Enfriamiento en dos fases.....	36
3.8.3	Batido.....	36
3.9	Yogur pasteurizado.....	37
3.10	Envasado.....	37
3.11	Embalaje.....	39
3.12	Almacenamiento frigorífico, transporte y distribución.....	40
4	Inventario.....	41
4.1	Sistema estudiado.....	41
4.2	Balance de materia	43
4.2.1	Balance de materia del acondicionamiento de la leche	44
4.2.2	Balance de materia del subsistema pasteurización / inoculación	52
4.2.3	Balance de materia del subsistema de envasado/incubación.....	54
4.2.4	Balance de materia del subsistema Almacenado yogur-Embalaje.....	56
4.2.5	Balance de materia del sistema estudiado.....	57
4.3	Balance de energía.....	58
4.3.1	Pérdidas de energía.....	61
4.3.2	Recepción y almacenamiento de la leche cruda.....	62
4.3.3	Normalización de la grasa o desnatado.....	63
4.3.4	Normalización del extracto sólido magro y homogeneización.....	66

4.3.5	Pasteurización.....	69
4.3.1	Inoculación.....	75
4.3.2	Envasado.....	76
4.3.3	Incubación.....	77
4.3.4	Refrigeración y Reposo.....	78
4.3.5	Almacenado.....	81
4.3.6	Energía mecánica.....	81
4.3.7	Operaciones de limpieza.....	85
4.3.8	Sistema de calefacción.....	86
4.3.9	Sistemas de refrigeración.....	87
4.3.10	Asignación de cargas.....	88
4.3.11	Resumen.....	89
4.3.17	Balance de energía.....	96
5	Evaluación de impactos.....	98
5.1	Resultados de la evaluación de impactos.....	102
5.1.1	Peso de las distintas etapas en el impacto global del proceso.....	104
5.1.2	Comparación de los diferentes sistemas de normalización del ESM.....	109
5.1.3	Comparación de los diferentes sistemas de pasteurización.....	111
5.1.4	Comparación de los sistemas de incubación.....	114
5.1.5	Comparación de los envases.....	115
6	Conclusiones.....	118
7	Bibliografía.....	120

1 Introducción

El presente trabajo es un análisis del ciclo de vida simplificado en el que se evaluará la huella de carbono causada por la fabricación del yogur.

Para su realización debe estudiarse el proceso de fabricación, realizar los balances materiales y de energía de dicho proceso y finalmente proceder a la evaluación ambiental.

1.1 Análisis del ciclo de vida

El Análisis del Ciclo de Vida es una herramienta para contabilizar los aspectos ambientales de un producto, servicio o proceso, desde su concepción hasta su eliminación. El conjunto de estas etapas es lo que se denomina ciclo de vida.

En el ciclo de vida se incluyen desde la extracción y procesamiento de las materias primas, pasando por la fabricación, el transporte, la distribución, la utilización, la reutilización, el mantenimiento, el reciclaje hasta la disposición de los residuos [1].

El objetivo de un Análisis de Ciclo de Vida es la reducción de los impactos ambientales asociados a un producto o actividad mediante mejoras de los procedimientos estudiados, como la reducción del consumo de materias primas, de energía o de emisiones al medio ambiente.

La técnica seguida para su realización es, según la definición de la NORMA ISO/DIS 14040:1996 (E): compilación en un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas; e interpretación de los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio.

Mediante el Análisis del Ciclo de Vida se pueden identificar los puntos críticos del proceso y los cambios que pueden incidir en éstos para obtener mejoras. Las aplicaciones del ACV son [1]:

- Identificación de procesos, ingredientes y sistemas que más contribuyen a los impactos medioambientales
- Cambios en el proceso de producción
- Cambios en el diseño del producto
- Comparación de materiales
- Comparación de productos funcionalmente equivalentes
- Guiar una planificación estratégica de producción
- Incremento de la competitividad
- Aportación de información sobre el producto a auditorías, consumidores y administración

La metodología del ACV considera unas fases de trabajo interrelacionadas, que siguen una secuencia más o menos definida. A partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior y reconducirla [2].

La primera fase es la definición de objetivos y alcance del estudio, donde se definen el propósito y el ámbito del estudio; el alcance y profundidad del estudio; y se establece una unidad funcional y un procedimiento que garantice la calidad de los datos.

La segunda fase es el inventario de ciclo de vida (ICV), donde mediante un diagrama de flujo donde aparecen todas las etapas del proceso, se resuelven los balances de materia y energía del sistema en estudio que dan lugar a las diferentes cargas ambientales.

La tercera fase es la evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV), donde los resultados del inventario se clasifican por categorías de impacto, según su capacidad de afectar a la salud y bienestar humano o al medio ambiente; seguidamente se caracterizan o cuantifican y finalmente se valoran.

En la última fase, análisis de mejoras o interpretación, se presentan gráficamente los resultados obtenidos, por categorías, etapas del ciclo de vida, procesos o sustancias. Seguidamente se identifican y evalúan las áreas de posible mejora.

La elaboración de un ACV completo es larga y costosa, por lo que para ciertas aplicaciones, como en fases iniciales de ACV completos, de auditorías medioambientales o en el diseño de productos se requieren ACV simplificados. En el ACV simplificado se aplica la metodología del ACV para llegar a una evaluación aproximada. La fase de objetivos y alcance no se simplifican, sólo las de inventario, evaluación de impactos e interpretación de resultados.

Un ACV simplificado consta de tres etapas:

- Estimación: el sistema se examina mediante indicadores estimativos como pueden ser la demanda energética, el flujo de materiales, sustancias clave (el inventario se limita o a un grupo de sustancias o a una sola clase de impacto) o indicadores semicuantitativos (se consideran todos los recursos y emisiones relevantes clasificados cualitativamente según su importancia ecológica y según la cantidad emitida o consumida).
- Simplificación: se realiza el estudio del sistema para obtener los puntos más significativos, que se incluirán en el ACV simplificado y el resto se elimina. En la fase de inventario pueden eliminarse etapas, materiales minoritarios (salvo materiales de elevada toxicidad, el criterio es de dejar fuera del límite del sistema los materiales usados en cantidad inferior al 5% del total del sistema) o estimarse datos; en la fase de evaluación de impacto pueden escogerse sólo algunas categorías de impacto o usar en su lugar indicadores (como el uso de la energía o la emisión de metales pesados).
- Evaluación de la fiabilidad: deben evaluarse las diferencias del procedimiento (respecto a un ACV completo) y la fiabilidad del resultado, que depende del procedi-

miento, la calidad de los datos y las metodologías usadas en la asignación de cargas y evaluación de impactos.

1.2 Sector lácteo

La leche y los productos lácteos son uno de los alimentos más antiguos utilizados por el hombre. Constituyen una parte importante de los alimentos que componen la dieta habitual de los habitantes de nuestro país, siendo los de origen vacuno los más consumidos [3].

Las industrias lácteas en España procesan una media anual estimada de 7.500.000 t de leche de vaca, oveja y cabra. Sus ventas representan en torno al 10% de las ventas de la industria alimentaria, lo que significa un 2% del total de la industria española [4].

La Tabla 1.1 resume los datos de producción del sector lácteo para el Estado Español.

Dentro del sector lácteo, las leches acidificadas y especialmente el yogur, suponen un importante volumen de producción. El mercado de yogures en España se cifra según la Tabla 1.2. El consumo nacional de yogures en hogares, por tipos, se resume en la *Tabla 1.3*.

En el marco de la Comunidad Europea, la producción anual de leche de cada país está distribuida en cuotas lácteas, que a su vez en España están distribuidas por comunidades autónomas.

En el Estado Español, la norma legal de producción y comercialización de leche y productos lácteos en general está recogida en el R. D. 1679/94 y en las modificaciones posteriores recogidas en el R. D. 402/96. En Catalunya, la normativa sobre la calidad y el control de la leche se ha establecido en el Decreto 221/2001, en el que se especifican las normas para el control y mejora de la calidad de la leche cruda tratada o transformada en Catalunya cuyo objetivo es comprobar que la leche cumple con las condiciones de calidad fijadas y promover la mejora integral de las explotaciones lecheras mediante la adopción de planes colectivos [3].

Tabla 1.1 Producción láctea (miles de t) para el Estado Español [5]

PRODUCTO	2008	2009	2010
Leche recogida de vaca	5.862,7	5.768,6	5.887,3
Leche de consumo	3.609,0	3.577,8	3.517,5
Leche concentrada	46,5	46,2	45,5
Productos en polvo	23,9	21,6	21,0
Nata de consumo directo	145,2	133,1	139,3
Mantequilla	39,7	36,7	37,9
Quesos (todos los orígenes)	317,0	312,8	301,9
Quesos fundidos	25,0	34,1	33,8
Leche acidificada (yogur y otras)	803,0	793,8	760,8
- Natural	156,6	231,9	230,5
- Otros (sabores, frutas, ...)	646,4	561,9	530,3
Postres lácteos	189,8	176,7	165,3
Batidos	380,2	400,0	420,1

Tabla 1.2 Mercado de yogures en España [4], [5]

	2008	2009	2010
Volumen (t)*	730.342	769.757	785.608
Valor (mill. €)*	1.943,73	1.874,99	1.915,41
Volumen exportaciones (t)	81.630	55.975	59.520
Volumen importaciones (t)	186.630	176.821	177.470
* datos hasta octubre			

Tabla 1.3 Consumo de yogur en hogares en España, en t [4]

	2008	2009	2010
Natural	95.304	95.807	94.140
Sabores	103.876	105.840	107.967
Frutas	26.085	27.028	29.333
Desnatados	125.326	117.396	130.343
Otros	66.287	72.622	88.535
Total yogur	416.878	418.694	450.318
Bífidus	126.205	134.185	147.108
Otras leches fermentadas	120.640	129.324	120.273
Total leches fermentadas	663.723	682.205	717.700

Cada país elabora una serie de disposiciones que facilitan la relación compra-venta entre los ganaderos y las centrales lecheras, conocidas como sistemas de pago por calidad, donde se evalúan una serie de parámetros de la calidad de la leche para poder decidir el precio que la industria debe pagar al productor. Estos requisitos son por un lado los que obliga la normativa para asegurar la higiene de la leche y para evitar el fraude (número de microorganismos aerobios totales por mL, número de células somáticas por mL, ausencia de sustancias inhibidoras del crecimiento microbiano y otras sustancias nocivas y prohibición de la adición de agua). La industria, por otra parte, suele primar el contenido en proteína y el contenido en grasa. El precio de la leche y las primas o penalizaciones en función de los diferentes parámetros se negocia entre los ganaderos y las industrias.

Los análisis de la leche para el pago por calidad los realizan los laboratorios interprofesionales de la leche, que normalmente son de ámbito regional y, en el caso de España, funcionan por comunidades autónomas. En Catalunya esta labor corresponde al Laboratori Interprofessional LLeiter de Catalunya de la Associació LLeitera Interprofessional de Catalunya (ALLIC) cuya junta directiva está formada a partes iguales por representantes del Gremio de Industrias Lácteas de Catalunya y de las diferentes organizaciones agrarias de productores.

1.3 Principales componentes de la leche

La composición de la leche depende del origen del animal, de su alimentación y de la época del año en que es recogida.

Los principales componentes de la leche de vaca, por término medio, se encuentran en la Tabla 1.4. Los componentes de la leche se pueden especificar como sólidos totales o Extracto Seco Total (EST), y dentro de éstos, la Materia Grasa (MG) y los sólidos no grasos o Extracto Seco Magro (ESM).

La materia grasa se encuentra dispersa en la leche en forma de glóbulos esféricos con tendencia a reunirse en racimos, y de dimensión variable. Los glóbulos grasos están constitui-

dos por una micro-gota de triglicéridos recubiertos de una membrana que los protege de la acción enzimática y de la oxidación e impide que los glóbulos grasos floculen y se fundan.

Tabla 1.4 Composición media de la leche de vaca [6]

Agua		87,02 %
Extracto Seco Total	Materia Grasa	3,98 %
	De la cual:	
	- Triglicéridos	3,90 %
	Extracto Seco Magro (9,00%)	Glúcidos
	De los cuales:	
	- Lactosa	4,77 %
	Proteínas	3,48 %
	De las cuales:	
	- Caseína	2.83 %
	Minerales	0,75%

La lactosa representa más del 99,9% de los glúcidos presentes en la leche y después del agua, es su principal componente. Su poder edulcorante es de 17 sobre un valor de referencia de 100 para la sacarosa [3].

De la fracción proteica, la caseína es el principal componente, 25 g/L. La caseína es un grupo de proteínas que se caracteriza por precipitar a pH 4,6, su tendencia a agregarse en presencia de iones calcio y la distribución de su carga eléctrica [3].

Las caseínas se encuentran organizadas en forma de micelas fuertemente hidratadas, cuyo tamaño disminuye al reducir la temperatura. La estabilidad de las micelas depende de su tamaño (cuanto más pequeñas son, más estables), del agua de hidratación y de la carga eléctrica.

En cuanto a las propiedades físicas de la leche, su pH oscila entre 6,5 y 6,7, siendo el valor más común el de 6,6. La densidad oscila entre 1,028 y 1,038 kg/L dependiendo de su composición y se puede calcular mediante la siguiente fórmula [7]:

$$\delta(15.5^{\circ}C) = \frac{100}{\frac{MG}{0.93} + \frac{ESM}{1.608} + Agua} \frac{kg}{L}$$

MG = % de Materia Grasa

ESM = % de sólidos no grasos o Extracto Seco Magro

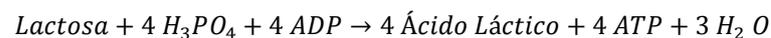
Agua = 100 – MG – ESM

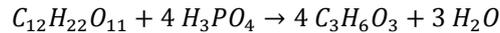
Los diferentes productos lácteos se obtienen por separación o transformación de sus principales componentes: la grasa, la proteína y la transformación de la lactosa en ácido láctico.

1.4 Caracterización y tipos de yogur

El yogur es el producto obtenido de la coagulación de la leche por acción de las bacterias lácticas *Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*.

Durante la fermentación, se transforma principalmente la lactosa en ácido láctico, descendiendo de esta manera el pH hasta 4,6-4,0. Este descenso produce la coagulación de la caseína en forma de gel y la inhibición de microorganismos patógenos. El proceso de fermentación comprende muchas reacciones bioquímicas. La reacción fundamental y simplificada sería [3]:





En España, la Norma de Calidad para el yogur (R. D. 179/2003) define y establece diferentes aspectos en cuanto a composición, características, aditivos, higiene y envasado.

Los microorganismos productores de la fermentación láctica deben ser viables y estar presentes en el producto terminado en cantidad mínima de $1 \cdot 10^7$ colonias por gramo o mL.

Todos los yogures deberán tener un pH inferior o igual a 4,6.

Según los productos añadidos, antes o después de la fermentación, o la aplicación de tratamiento térmico después de la fermentación, los yogures se pueden clasificar en varios tipos:

- Yogur natural, es el descrito en la definición.
- Yogur azucarado, es el yogur natural al que se le han añadido azúcares comestibles.
- Yogur edulcorado, es el yogur natural al que se le han añadido edulcorantes autorizados.
- Yogur con fruta, zumos y/u otros productos naturales, es el yogur natural al que se le han añadido fruta, zumos y/u otros productos naturales.
- Yogur aromatizado, es el yogur natural al que se le han añadido agentes aromáticos autorizados.
- Yogur pasteurizado después de la fermentación, es el producto obtenido del yogur tras la aplicación de un tratamiento térmico posterior a la fermentación, equivalente a una pasteurización, y que ha perdido la viabilidad de las bacterias lácticas características. No necesita conservarse refrigerado y la fecha de duración mínima se expresará como fecha de consumo preferente, en lugar de fecha de caducidad.

Existen además las leches fermentadas probióticas, que son yogures que además aportan microorganismos capaces de implantarse en el intestino grueso humano.

Según el contenido en materia grasa láctea, el yogur puede ser desnatado, semidesnatado, entero y cremoso.

Según la consistencia del yogur, puede clasificarse en:

- Yogur firme, que es fermentado y enfriado en el mismo envase.
- Yogur batido, que es incubado y enfriado antes de su envasado
- Yogur líquido, similar al yogur batido pero con el coágulo más roto hasta obtener una forma más líquida antes del envasado.

2 Definición de objetivos y alcance

2.1 Objetivos

El objetivo de este estudio es la elaboración del proyecto de final de carrera, mediante la introducción de la metodología del análisis de ciclo de vida en un proceso industrial.

Durante la elaboración del estudio se pretende profundizar en el proceso de elaboración del yogur natural tradicional para, posteriormente realizar el estudio ambiental de dicho proceso.

Dicho estudio será de uso interno de la Escola d'Enginyeria de Igualada y está destinado a la comunidad universitaria, concretamente, al tribunal de evaluación del Proyecto de Fin de Carrera y a posibles estudiantes interesados.

2.2 Alcance

La función del sistema estudiado es alimentar con un postre lácteo y la unidad funcional escogida es 10.300 kg de yogur natural tradicional.

El sistema estudiado es el conjunto de procesos unitarios que permiten la presencia del producto en el mercado, que se representa mediante un diagrama de flujo en la Ilustración 2.1.

El alcance del sistema son los límites o subsistemas que se consideran en el estudio. En este caso, marcados en la ilustración en verde, el alcance del estudio son las operaciones de fabricación del yogur desde la recepción de la leche procedente de la granja hasta el momento de su salida para la distribución a los comercios.

El análisis se centrará en una sola categoría de impacto, el calentamiento global. Dicha categoría de impacto se evaluará siguiendo el método desarrollado por el Instituto de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden y conocido como CML 2009. Este método consiste en asignar determinado peso a cada uno de los contaminantes que afecta al calentamiento global o cambio climático y es un método reconocido internacionalmente.

La asignación de cargas se realiza en aquellos procesos que conducen a más de un producto, para repartir las cargas ambientales del proceso entre todos los productos obtenidos. Dicha asignación se realizará por masa ya que, en este caso, es la que mejor representa la causalidad.



Ilustración 2.1 Sistema de fabricación del yogur y alcance del estudio

3 Descripción del proceso

A continuación se describen las diferentes etapas del proceso de fabricación del yogur, esquematizado en la Ilustración 3.1.

3.1 Recepción de la leche

Cuando la leche llega procedente de las granjas a las industrias, se determina primero la cantidad de leche recibida, medida en volumen o en peso y las condiciones organolépticas de ésta (sabor y olor, pruebas de limpieza, pruebas de sedimentos, pruebas de higiene, recuento de células somáticas, recuento de bacterias, contenido en proteínas, contenido en grasa, punto de congelación, presencia de inhibidores y otras sustancias nocivas).

En un intercambiador de calor de placas se enfría por debajo de +4°C y se almacena en tanques silo de almacenamiento, de capacidad entre 25.000 y 150.000 L y de acero inoxidable pulido en su cara interna, con un sistema de agitación suave (de hélice) que evita la separación de la nata por gravedad [7].

La leche debe ser filtrada con el fin de separar los contaminantes que pueda haber adquirido en la granja durante el proceso de obtención de la leche. Se utilizan tamices de tela o centrífugas. Cuando la filtración se efectúa después de la adición de productos lácteos en polvo, se utilizan tamices de tela metálica.

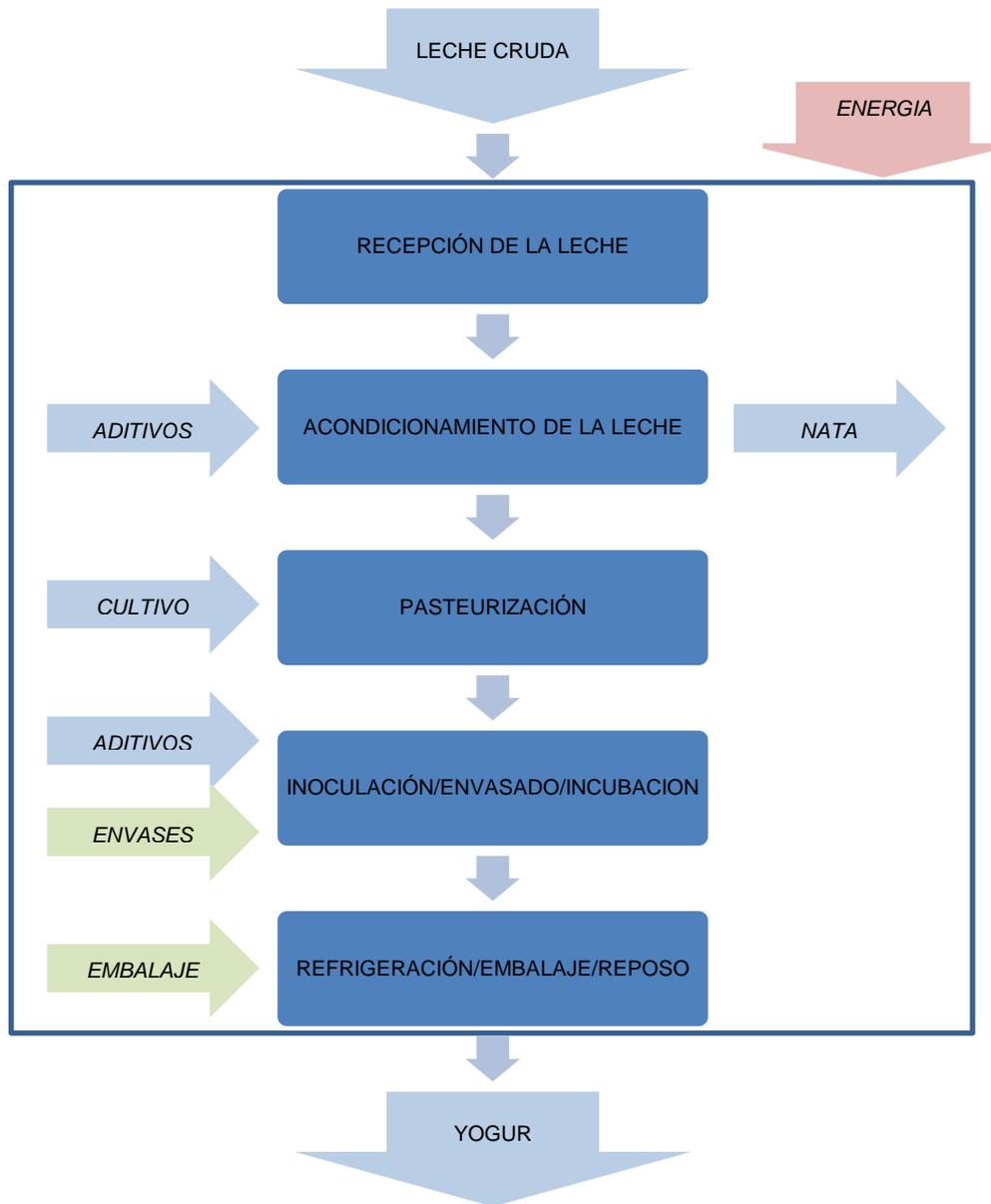


Ilustración 3.1 Diagrama de proceso de la fabricación del yogur

La leche debe ser pasteurizada dentro de las 24 h siguientes a su recepción en la industria. La pasteurización es un tratamiento térmico mediante el cual se destruyen los microorganismos patógenos o causantes de la degradación de la leche y que permite alargar el período de conservación de ésta.

En el caso de tener que conservarse la leche durante varios días antes de procesarla, se somete a un tratamiento de termización, ya que no está permitida la doble pasteurización. La termización es un tratamiento térmico en el que la leche se calienta a 63-65°C durante 15 segundos, para inhibir eventualmente el crecimiento bacteriano y rápidamente debe ser enfriada por debajo de 4°C, no pudiéndose mezclar con la leche cruda no tratada [7].

3.2 Preparación o acondicionamiento de la leche

Para asegurar un producto homogéneo y de una calidad estandarizada, es preciso normalizar el contenido en grasa y en extracto seco magro de la leche. El proceso de acondicionamiento de la leche se esquematiza en la *Ilustración 3.2*.

3.2.1 Normalización del contenido en grasa

El contenido en grasa de los yogures está regulado por la Norma de Calidad para el yogur (RD 179/2003) en la que se especifica que el contenido en grasa de los yogures desnatados ha de ser inferior al 0,5%, del 0,5 al 2% para los semidesnatados y más del 2% para el resto, que en yogures cremosos puede llegar al 10% [8] [3].

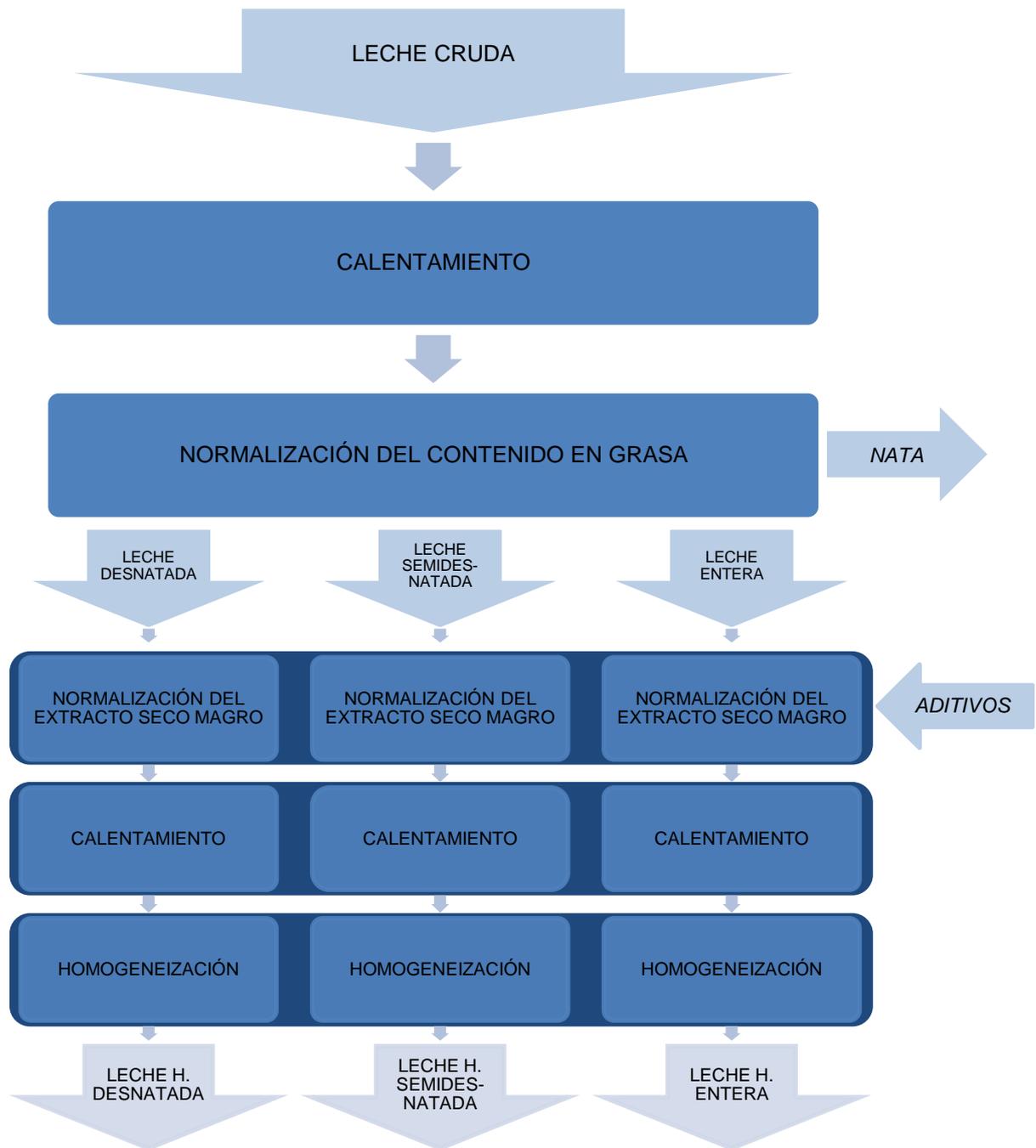


Ilustración 3.2 Diagrama de flujo del acondicionamiento de la leche

La normalización del contenido en grasa se puede realizar siguiendo los siguientes métodos:

- Eliminación de la grasa de la leche por centrifugación a una temperatura máxima de 55°C [3]: se obtiene nata que debe ser pasteurizada a temperatura superior a 80°C durante 5 segundos [7] y rápidamente enfriada.
- Mezcla de leche entera y leche desnatada.
- Adición de nata a la leche, entera o desnatada.

Del proceso de normalización por centrifugación se obtienen nata y tres calidades de leche según su contenido graso: leche desnatada, leche semidesnatada y leche entera.

3.2.2 Normalización del extracto seco magro de la leche

El extracto seco magro de la leche incluye principalmente lactosa, proteínas y sales minerales. El porcentaje en la leche para la elaboración de yogur viene regulado, por un lado, por las normas legales, y por otro lado, por las propiedades físicas (consistencia, viscosidad y aroma) del producto que se desea conseguir.

La Norma de Calidad española regula un contenido mínimo del 8.5%. En la práctica, el extracto seco magro acostumbra a ser un 10% superior para conferir mayor consistencia o dureza al gel y para reducir el efecto de la sinéresis [6]. La mayor parte de los yogures tienen un 14-15% de extracto seco total.

La estandarización del extracto seco magro de la leche puede conseguirse con diferentes métodos:

- Concentración de la leche: tradicionalmente por ebullición hasta reducir el volumen a 2/3 del valor inicial o industrialmente mediante un evaporador de placas, eliminando así entre un 10 y un 25% de agua (el extracto seco aumenta un 2-4%) y el aire retenido (que reduce la estabilidad del coágulo y aumenta la sinéresis) [6].

-
- Adición de productos lácteos en polvo, según la Norma de Calidad hasta el 5% en yogur natural y hasta el 10% en los otros tipos: leche en polvo entera o desnatada (generalmente se añade un 3-4%); suero de leche en polvo (1-2%); caseína en polvo [6].
 - Concentración por membranas: Por ósmosis inversa (OI) donde se trabaja a presiones entre 2,7-10,4 MPa [6]; por ultrafiltración (UF), donde las presiones de trabajo son entre 0,1-1 MPa y con el que se obtiene una mejor calidad de yogur [3]. Cuando se siguen estos sistemas, primero se efectúa el desnatado de la leche, a continuación se concentra la leche y finalmente se normaliza el contenido en grasa de la leche desnatada añadiendo nata [6].

3.2.3 Adiciones facultativas

Al yogur se le pueden añadir otras sustancias para la elaboración de diferentes especialidades. Estas sustancias se pueden incorporar a la leche en cualquier momento durante el proceso de fabricación. Los aditivos que pueden añadirse tras la normalización del extracto seco magro son azúcares y edulcorantes, por ser resistentes al tratamiento térmico posterior de la leche. El resto de aditivos se añade tras la inoculación.

Según la Norma de Calidad, las sustancias que se pueden añadir son [8]:

- Azúcar y/o azúcares comestibles para el yogur azucarado, con fruta u otros productos naturales y el aromatizado.
- Edulcorantes autorizados por el RD 2002/1995 para el yogur edulcorado, con fruta u otros productos naturales y el aromatizado.
- Frutas, hortalizas y otros productos naturales para el yogur con fruta u otros productos naturales, con una cantidad mínima del 70% de yogur en el producto terminado.
- Agentes aromatizantes autorizados para el yogur aromatizado, con una cantidad mínima del 80% de yogur en el producto terminado.

-
- Gelatina para el yogur con fruta u otros productos naturales y el aromatizado, con una dosis máxima de 3 g/kg de yogur. Cuando además se utilicen estabilizantes, la cantidad máxima total será de 3 g/kg de yogur.
 - Almidones comestibles para el yogur con fruta u otros productos naturales y el aromatizado, con una dosis máxima de 3 g/kg de yogur.
 - Colorantes autorizados por el RD 2001/1995.
 - Aditivos distintos de colorantes y edulcorantes autorizados por el RD 142/2002.

Los estabilizantes que se utilizan en el yogur en proporciones de 0,1-0,5% son: gelatina, pectina, agar-agar y almidón [7]. Pueden añadirse a la leche antes de la pasteurización, justo después de la pasteurización o después de la incubación mezclado con los azúcares. No es aconsejable adicionar a la leche más de un 10% de azúcar antes de la incubación, por lo que usualmente se añade hasta un 5% de agente edulcorante a la mezcla base y el resto, por ejemplo un preparado de frutas edulcorado, es añadido en la inoculación o el envasado del yogur firme o al producto acabado en el yogur batido [7].

3.2.4 Homogeneización

Esta operación previene la separación de la grasa disminuyendo el tamaño de los glóbulos grasos. Consiste a forzar el paso de la leche a través de un pequeño orificio a presión elevada.

La homogeneización se realiza en una sola fase a 50-70°C y a 10.000-20.000 kPa de presión [3].

3.3 Pasteurización

Es el tratamiento térmico al que se somete la leche con el fin de eliminar los microorganismos patógenos y los indeseables y modificar la estructura de las proteínas lácteas para obtener una mayor estabilidad del coágulo y una disminución de la sinéresis durante el almacenamiento del yogur.

El tratamiento seguido es una pasteurización alta, cuya combinación de tiempo y temperatura puede ser [3]:

- 85°C, 30 min (HTLT)
- 90-95°C, 5-10 min (VHTST)
- 120°C, 2-3 s (UHT)

La pasteurización se realiza en intercambiadores de calor de placas o tubulares cuando la fabricación se realiza en continuo, o en tanques multiuso cuando es en discontinuo. Estos tanques están equipados con camisa de circulación de agua caliente o fría con regulación de la temperatura y sistemas de agitación. En ellos se puede realizar la mezcla base, la pasteurización y la fermentación y su capacidad va de 200 L a 20.000 L.

La Ilustración 3.3 representa el diagrama de flujo para las operaciones de pasteurización e inoculación.

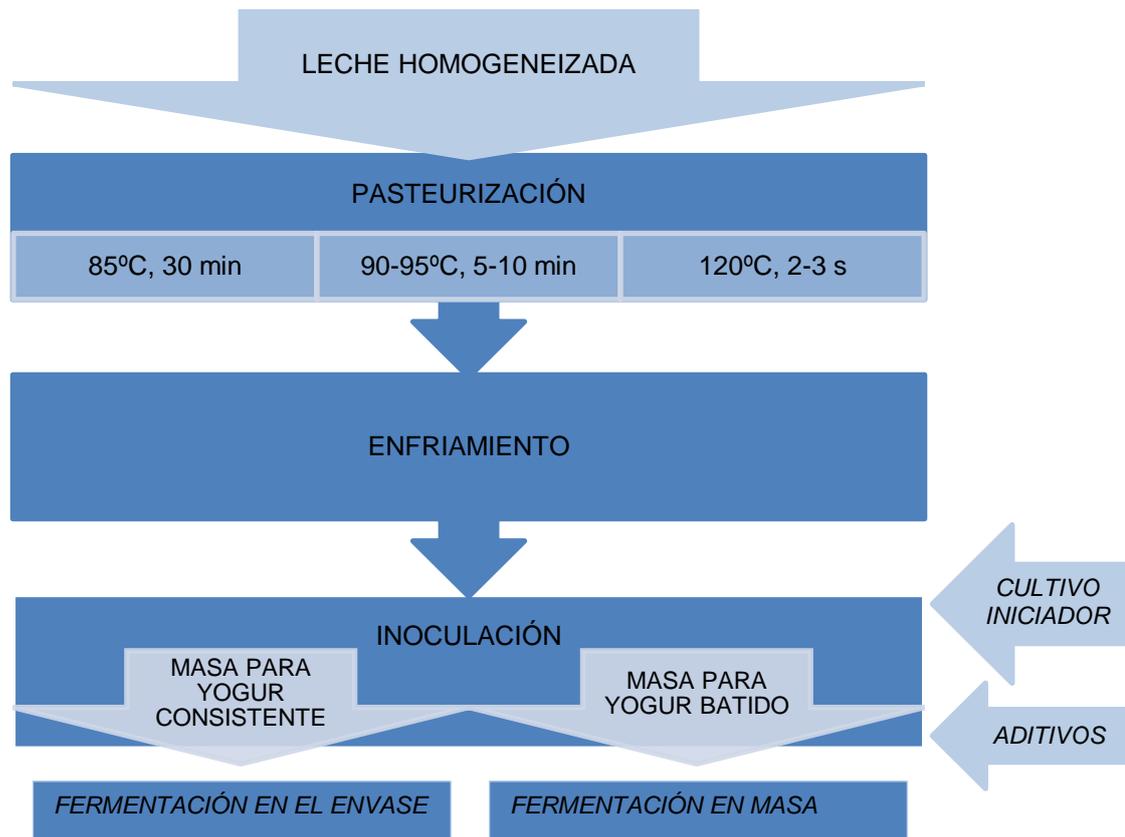


Ilustración 3.3 Diagrama de proceso para las operaciones de pasteurización e inoculación

3.4 Inoculación

Después del tratamiento térmico, la leche debe enfriarse, habitualmente hasta la temperatura de fermentación, 40-45°C, momento en el cual se le añade el cultivo iniciador. Cuando se trata de producir yogur firme y no se tiene la misma capacidad de pre-tratamiento de la leche que de envasado, debe enfriarse a menos de 10°C, preferiblemente a 5°C.

La adición del cultivo se realiza normalmente en depósitos de mezcla en el caso del yogur fermentado en el envase o directamente en el tanque de fermentación, en el caso del yogur

fermentado en masa. En este momento pueden añadirse aromas, colorantes y azúcares o edulcorantes.

El cultivo iniciador está compuesto de las bacterias lácticas *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus*, habitualmente a partes iguales y en una proporción del 2,5-3%, realizándose la fermentación en unas 2,5 h [3].

3.4.1 Características de la microflora esencial

Streptococcus thermophilus es una bacteria homofermentativa, que produce un 0,7-0,8 % de ácido láctico L(+), algunos ácidos grasos volátiles y con una actividad proteolítica muy pequeña. Es una bacteria termófila, su temperatura óptima de crecimiento es de 42-45°C, siendo 10°C la mínima y 50°C la máxima. Es también termodúrica (aguanta tratamientos de calor de 30 min a 60°C). Es sensible a inhibidores, antibióticos y a la sal.

Lactobacillus bulgaricus es una bacteria homofermentativa, que produce un 1,7 % de ácido láctico D(-), pequeñas cantidades de ácidos grasos volátiles, una actividad proteolítica mediana, con una importante liberación de aminoácidos. Es una bacteria termófila, su temperatura óptima de crecimiento es de 40-43°C, siendo 15°C la mínima y 52°C la máxima. No es una bacteria termodúrica, pero algunas cepas pueden aguantar tratamientos térmicos. Es más resistente a los antibióticos que *S. thermophilus*, pero es más sensible a la sal.

Ambos microorganismos soportan una acidez elevada y viven en simbiosis, la producción de ácido láctico es mucho mayor si se desarrollan conjuntamente que por separado. En condiciones anaerobias, los lactobacilos liberan péptidos pequeños y aminoácidos, que favorecen el crecimiento de los estreptococos y éstos a su vez producen ácido fórmico y CO₂, necesarios para el desarrollo de los lactobacilos.

La proporción óptima entre estreptococos y bacilos normalmente es de 1:1. Durante la fermentación, la proporción entre ambos microorganismos va variando, primero crecen más

deprisa los estreptococos y finalmente los lactobacilos hasta alcanzar la proporción inicial, momento en el cual el yogur debería haber alcanzado la acidez deseada.

Las variaciones de las condiciones de fermentación alteran la proporción entre bacilos y cocos:

- Tiempo de incubación: un tiempo de incubación corto favorece a los estreptococos y un tiempo de incubación largo favorece a los lactobacilos.
- Porcentaje de inóculo: aumentando el porcentaje de inóculo, se favorece a los lactobacilos y reduciéndolo se favorece a los estreptococos.
- Temperatura de incubación: las temperaturas bajas favorecen a los estreptococos y las altas a los lactobacilos.

3.4.2 Producción del cultivo estárter

La calidad y uniformidad del producto final depende de las técnicas de proceso utilizadas y sobretodo de la selección, conservación, manejo y resiembra o propagación de los cultivos estárter o iniciadores.

Los cultivos de yogur contienen las dos especies microbianas, *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus bulgaricus*, y habitualmente se cultivan y resiembran juntas, en cepas mixtas estárter producidas en gran escala. Estos cultivos se guardan en pequeñas cantidades conocidas como cultivos de reserva, que se someten a sistemas de siembra hasta obtener el volumen necesario, por ejemplo, para producir 25.000 L de yogur con un inóculo del 2% se necesitan 500 L de cultivo estárter.

Los cultivos estárter se siembran en medios estériles, principalmente leche desnatada o leche desnatada reconstituida de leche en polvo de gran calidad. El sustrato contiene un 9-12% de materia seca y se puede modificar con la adición de factores de crecimiento o medios inhibidores de fagos. Para períodos de almacenamiento corto, hasta una semana, se mantiene su actividad mediante refrigeración. Para períodos de almacenamiento más largo,

se recurre a la concentración y separación de los microorganismos, resuspensión en un medio estéril y finalmente conservación por deshidratación o por congelación.

El sistema de resiembras desde el cultivo de reserva sería:

Reserva (2%, 0.4 mL) → Madre (2%, 20mL) → Intermedio (2%, 10L) → Final (2%, 500L)

Los cultivos de reserva y madre se siembran en el laboratorio y el intermedio y el final o definitivo se preparan en la sala de cultivos estéril de la industria.

Otro sistema de conservación del cultivo es concentrado y liofilizado, que permite la inoculación directa al cultivo estéril final o definitivo o bien la inoculación directa de la leche en el caso de fabricación de yogur a pequeña escala, utilizando una cantidad de 5 g por 500-1.000 L de leche.

Por término medio, el inóculo es de un 2-3%, contiene más de 10^8 microorganismos viables por mL y se encuentra en la fase exponencial de crecimiento. Si la temperatura de incubación es de 40-45°C, ésta dura unas 2,5 horas, a 30°C la fermentación dura unas 18 horas. Cuando se añaden cultivos concentrados, congelados o liofilizados, directamente a los tanques de incubación de yogur, se precisa un tiempo de incubación más largo, de 4-6 h a 43°C, ya que se tiene una fase latente más larga.

3.4.3 Leche fermentada probiótica

Recientemente han surgido las leches fermentadas probióticas, que son yogures en los que a las bacterias empleadas en la elaboración del yogur se incorporan bacterias probióticas.

Los probióticos son bacterias viables no patógenas que colonizan el intestino y modifican la micro flora intestinal y sus actividades metabólicas y tienen efectos beneficiosos para la salud [9].

Los microorganismos probióticos se seleccionan por sus características relacionadas con la salud, sin olvidar que deben ser capaces de crecer en la leche y mantenerse viables en la misma. Deben seguir unos criterios de selección como: no ser patógenos; estar presentes en la microbiota del intestino humano; sobrevivir a su paso por el tracto digestivo hasta alcanzar el colon en condiciones viables; capacidad de adherirse a la superficie de las mucosas y prevenir la colonización de patógenos.

Los principales grupos de microorganismos presentes en las leches fermentadas probióticas son [3]:

- Lactobacilos: *L. acidophilus*, *L. johnsonii* La 1, *L. casei* subs. *casei*
- Bifidobacterias: *Bifidobacterium bifidus*, *B. longum*, *B. breve*, *B. infantis*
- Levaduras: *Sacharomyces bulardii*

Pueden añadirse en forma de cultivo iniciador preparado o por inoculación directa de fermentos congelados o liofilizados, en combinación con lactococos y estreptococos. La incubación depende del tipo de microorganismos y de las características del producto final.

Cuando la inoculación se hace por cultivo iniciador, se preparan dos tanques de cultivo, uno con el fermento tradicional en una proporción del 1% y otro con las bacterias probióticas, en el que es necesario suplementar la leche con sustancias promotoras del crecimiento (extracto de levadura, proteínas hidrolizadas de la leche y vitaminas), agitando lo mínimo posible para conservar las condiciones anaerobias y en una proporción del 5% de bacterias. Se incuba a 26°C durante 16-18 h hasta un pH de 4,45-4,50 [3].

Los cultivos iniciadores liofilizados o congelados de inoculación directa son mezclas de bacterias lácticas tradicionales y probióticas realizadas por los fabricantes.

3.5 Fermentación o incubación

El proceso que sigue a la inoculación depende del tipo de yogur que se vaya a producir. La diferencia entre el yogur tradicional o firme y el yogur batido estriba en las propiedades reológicas del coágulo, ya que en el primer tipo, la leche se deja en reposo durante el período de incubación, lo que determina la formación de un gel continuo semisólido, mientras que el yogur batido resulta de la ruptura de la estructura de gel al final del período de incubación, antes del enfriamiento y tratamiento posterior.

La fase de fermentación puede tener lugar en los envases de comercialización, en el caso de la elaboración de yogur tradicional, o en tanques, para la elaboración de yogur batido.

La *Ilustración 3.4* muestra paralelamente el diagrama de proceso para ambos tipos de yogur en las operaciones de incubación y envasado.

Durante la incubación se produce la formación de un gel, el yogur, resultado de las siguientes modificaciones en la leche:

- Los estárteres del yogur metabolizan la lactosa dando lugar a la formación de ácido láctico y de otros compuestos.
- La producción gradual de ácido láctico comienza a desestabilizar los complejos de caseína-proteínas del lactosuero desnaturalizadas, por solubilización del fosfato cálcico y de los citratos. El tamaño de las micelas decrece gradualmente con el pH.
- Los agregados de micelas de caseína y las micelas aisladas se van asociando y coalescen parcialmente a medida que el pH se aproxima a su punto isoeléctrico, 4,6-4,7.
- Cuando el pH alcanza el punto isoeléctrico, las micelas forman una estructura regular que atrapa en su interior al resto de los componentes de la mezcla base, incluyendo la fase acuosa.



Ilustración 3.4 Diagrama de flujo para las operaciones de incubación y envasado

3.6 Enfriamiento

Una vez se ha realizado la fermentación y el yogur ha alcanzado el pH deseado, entre 4,1-4,6, el coágulo debe ser rápidamente enfriado para detener la actividad de los microorganismos y evitar la sobreacidificación. Debe disminuirse la temperatura rápidamente a menos de 10°C, preferiblemente a 4-5°C, aunque no debe realizarse bruscamente para evitar la contracción del coágulo y la condensación de agua [3].

Una vez obtenido el yogur, debe mantenerse refrigerado y tratarse con cuidado, especialmente el coagulado en el envase, para mantener las características óptimas del producto.

3.7 Yogur firme

En el caso del yogur firme, la coagulación se produce en el envase.

Al tiempo que se añade el cultivo iniciador, se pueden añadir aromas, colorantes, edulcorantes, etc. Seguidamente se procede al envasado. La fermentación se puede llevar a cabo en:

- Baños de agua a la temperatura adecuada, donde el nivel del agua se mantiene por debajo de la tapa del envase. Después de la coagulación se sustituye el agua caliente por agua fría para enfriar rápidamente el coágulo.
- Estufas o cabinas donde circula aire caliente. Pueden incluir la circulación de aire frío para refrigerar los envases después de la fermentación. Si no es así, una vez formado el coágulo los yogures pasan a cámaras de refrigeración y almacenamiento.
- Túneles donde los yogures circulan a través de una cinta transportadora. Pueden ser sólo de circulación de aire caliente en los que al final del recorrido y con el coágulo formado se pasan a cámaras de refrigeración y almacenamiento. Pueden tener una sección de circulación de aire caliente y otra de aire frío. Finalmente pueden

ser de circulación sólo de aire frío, para enfriar rápidamente los yogures después de la incubación en estufa.

Después de llenos los envases, son dispuestos en bandejas, y para los dos últimos sistemas de incubación, apiladas en palés y llevadas a las cámaras o túneles de incubación. Las bandejas deben ser de diseño abierto y los envases deben estar separados unos de otros para permitir que el aire, caliente o frío llegue a cada envase individual.

El enfriamiento se realiza por circulación de aire frío en cámaras o túneles de refrigeración o por circulación de agua fría en el caso de utilizar baños de agua. En todos los casos es muy importante que los envases permanezcan en reposo y que sus traslados se realicen cuidadosamente para evitar roturas del coágulo.

En el enfriamiento se debe alcanzar una temperatura de 35°C en los primeros 30 minutos y 18-20°C después de 30-40 minutos más. El enfriamiento final, normalmente a menos de 5°C, tiene lugar en cámaras de almacenamiento refrigerado, donde se mantienen los productos en espera de la distribución. El tiempo total de enfriamiento es de unos 65-70 minutos para pequeños envases (0,175-0,2 kg) y de unos 80-90 minutos para grandes envases (0,5 kg).

La eficiencia de enfriamiento depende del tamaño del envase individual, el diseño y el material del envase, el espacio entre los envases, la profundidad de la pila de bandejas y el diseño de las bandejas. A una profundidad de 1 m, la sección de paso libre de la pila para el flujo de aire no debe ser inferior al 25% del área total (una sección de paso libre de aire más pequeña requerirá mayor caudal de aire y mayor consumo energético) [7].

3.8 Yogur batido

En la fabricación del yogur batido la fermentación se puede realizar:

-
- En tanques de fermentación. La leche pre-tratada y enfriada hasta la temperatura de incubación se bombea hacia los depósitos de incubación. Simultáneamente se dosifica en la corriente de leche un volumen predeterminado de cultivo estértil. Una vez que el tanque se ha llenado, se agita durante un tiempo corto para asegurar una distribución uniforme del cultivo. Los tanques de incubación deben estar aislados para asegurar la constancia de la temperatura durante el proceso de fermentación y pueden estar diseñados para la producción en condiciones asépticas. Transcurrida la fermentación se procede a la refrigeración en intercambiadores de calor.
 - En tanques multiusos, descritos en el apartado de la pasteurización. Una vez enfriada la leche después de la pasteurización a la temperatura de incubación, se inocula y se añaden los aditivos, se agita la mezcla y posteriormente se deja en reposo el tiempo de fermentación. Finalmente se reduce la temperatura de la mezcla para parar la fermentación.
 - En tanques de fermentación/refrigeración, en los que después de la fermentación circula agua fría por la camisa para enfriar el coágulo.

Tras la refrigeración y previamente al llenado, se pueden añadir aromatizantes, colorantes, edulcorantes y frutas mediante una bomba dosificadora de velocidad variable.

La refrigeración y batido del yogur coagulado en masa se puede hacer en dos fases o en una sola fase.

3.8.1 Enfriamiento en una sola fase

El coágulo se enfría directamente desde la temperatura de incubación hasta temperaturas inferiores a 10°C antes de proceder a la adición de los agentes aromáticos y al envasado del producto. El fundamento de este método es que el coágulo es más estable a temperaturas bajas que a temperaturas superiores a 20°C, es decir, se mantiene más estable durante el envasado, almacenamiento y comercialización.

3.8.2 Enfriamiento en dos fases

Cuando el yogur alcanza el pH requerido, 4.1-4.6, la temperatura debe bajarse en 20-30 min, a 15-22°C en un intercambiador de calor de placas [7]. La bomba y el intercambiador deben dimensionarse para vaciar el depósito en éste tiempo. En esta fase se procede al batido. Después se añaden los agentes aromatizantes, edulcorantes, frutas, etc. mediante una bomba dosificadora de velocidad variable y se bombea a depósitos pulmón antes de enviarse a las llenadoras.

La segunda fase de enfriamiento se realiza en cámaras de refrigeración en las que el yogur se enfría hasta temperaturas inferiores a 10°C. Después de 1-2 días de almacenamiento del yogur en reposo, aumenta la viscosidad, mejorando la consistencia del producto.

3.8.3 Batido

Durante el enfriamiento se procede al batido. El batido estabiliza el yogur contra la separación del suero. El batido se puede realizar por laminación, agitación u homogeneización. Cuando la refrigeración se realiza a través de un intercambiador de calor, que suele ser tubular o de placas, el paso del yogur a través de las tuberías y su bombeo contribuyen al batido. La homogeneización no se recomienda en el yogur batido, pero sí en el líquido, a una presión de 2.500-5.000 kPa [3].

La intensidad del tratamiento mecánico afecta a la viscosidad del yogur, una fuerte acción mecánica determina una consistencia más líquida, que puede ser compensada con la adición de estabilizantes. Si se bate incorporando aire, se favorece la sinéresis. El grado de rompimiento del gel depende del tipo de yogur que se desea obtener. Para el yogur batido, las partículas de gel poseen un diámetro aproximado de 0,1-0,4 mm mientras que en el yogur líquido el diámetro es inferior a 0,01 mm. El batido acostumbra a realizarse a dos velocidades, al principio a baja velocidad y al final a una velocidad más elevada. La intensi-

dad y tiempo óptimos de batido dependen de la temperatura, pH, consistencia del gel y capacidad del depósito [3].

La diferencia entre el yogur batido y el yogur líquido es que el segundo se fabrica con una mezcla base de leche con un extracto seco más bajo, del orden de 11-12% y recibe un tratamiento mecánico de batido más intenso [3].

3.9 Yogur pasteurizado

Cuando existe la necesidad de aumentar la vida comercial del producto, porque los centros de producción están más alejados de los mercados o cuando existe la dificultad de mantener la cadena del frío, se puede recurrir a un tratamiento térmico del yogur, antes de su llenado o ya en el envase.

Para ello, al yogur se le añade un estabilizador y posteriormente se calienta a 72-75°C, temperatura que mata a todos los microorganismos patógenos que pudieran estar presentes [7].

En el caso del yogur batido, el gel obtenido en los depósitos de incubación se calienta en un intercambiador de calor con un tiempo de mantenimiento de unos pocos segundos, antes de proceder a su enfriamiento. El envasado se deberá realizar en llenadoras asépticas.

El yogur firme se calienta en los envases durante 5-10 minutos en cámaras de pasteurización y posteriormente se enfría.

3.10 Envasado

Según la Norma de Calidad para el Yogur, éste debe presentarse debidamente envasado en recipientes cerrados. Los materiales del envase pueden ser vidrio, cartón parafinado,

porcelanas, material macromolecular o cualquier otro material autorizado por este fin por el Ministerio de Sanidad y Consumo, con un contenido neto mínimo de 125 g.

Los envases del yogur deben ser resistentes a los ácidos, evitar la pérdida de las sustancias volátiles responsables del aroma e impermeables al oxígeno.

En los envases de vidrio los cierres pueden ser metálicos o con láminas de aluminio termoselladas.

Los materiales poliméricos empleados suelen ser: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC) y cloruro de polivinilideno (PVDC). Los envases pueden ser semirígidos o rígidos, según la técnica de fabricación del envase [6]:

- En el proceso de moldeo por inyección, los envases obtenidos son rígidos: el material se ablanda en un cilindro a elevada temperatura antes de ser inyectado a presión en un molde frío en el que se endurece y una vez formado se expulsa. Los envases preformados se apilan en el interior de bolsas selladas de PE de 25 µm de espesor, que se empaquetan en cajas de cartón en las que se distribuyen a las industrias lácteas, donde se apilan en la llenadora (operación de llenado y cierre).
- En el proceso de termoformación, los envases obtenidos son semirígidos: El material polimérico se envía a la industria láctea en forma de rollo, protegido, y allí se acopla a la máquina de envasado. La lámina de plástico se ablanda por calentamiento y se procede a la formación del envase mediante un molde. Inmediatamente se procede a su llenado (operación de formación/llenado y cierre) y finalmente se dividen o cortan para separar los recipientes en grupos.

El cierre de los recipientes de vidrio suele hacerse con láminas de aluminio (de corona, con bordes plegados o termoselladas) o con tapas de plástico a presión o termoselladas. Las más habituales son las de aluminio termoselladas, que deben barnizarse para evitar su corrosión y facilitar la adhesión, con PE, copolímeros de acetato de etileno (EVA), PS o PVC.

El envase de cartón encerado está en desuso por su tendencia a ablandarse. Otros envases de cartón son los simples: las dos caras del cartón están recubiertas con material plástico,

por ejemplo PE; y los envases de cartón multicapa, que constan de PE/papel/aluminio/PE. Estos envases se sirven preformados y plegados o en forma de rollos.

Para los recipientes de plástico preformado, las tapas de aluminio se presentan precortadas, en lotes de 2.500-3.000 tapas, con un diámetro inferior a 100 mm, un espesor de 40 μ y presentan un gravado para facilitar la toma de una sola tapa.

Para los recipientes termoformados, las láminas se distribuyen en forma de rollos de anchura variable en función del número de boquillas de llenado de la máquina de envasado, de espesor similar a las precortadas, pero sin gravar.

En las láminas de aluminio puede imprimirse información por flexografía o gravado. La cara interna de las capas se recubre con un material termosellable de espesor 6-10 g/m^2 , que varía en función del material empleado (6-8 g/m^2 para PE o PP). En la cara impresa de las láminas el revestimiento de EVA se recubre con una capa de barniz resistente a las altas temperaturas [6].

Se puede agrupar los envases en paquetes para su comercialización mediante fajas o agrupadores, habitualmente de cartón o bien en bandejas.

3.11 Embalaje

Los embalajes sirven para facilitar el manejo y almacenamiento de los envases durante la comercialización, transporte y distribución a los minoristas. Pueden ser de dos tipos:

- Retornables: son de metal o plástico rígido. No son muy utilizados porque originan problemas de almacenamiento. Son más empleados en la comercialización del yogur envasado en vidrio.
- De un solo uso:
 - o Embalajes de plástico semirígidos
 - o Bandejas de plástico flexible
 - o Bandejas de cartón

3.12 Almacenamiento frigorífico, transporte y distribución

La refrigeración del yogur a temperaturas inferiores a 10°C ralentiza las reacciones que pueden tener lugar en el producto, conservando la calidad hasta varias semanas después de su fabricación.

La fecha de caducidad de los yogures está regulada en la norma de calidad (RD 179/2003), que dice que el yogur deberá ser vendido al consumidor, como máximo, dentro de los veintiocho días siguientes, contados a partir de su fabricación y mantenidos a temperaturas comprendidas entre 1 y 8°C [8].

Durante las primeras 24-48 h de almacenamiento en refrigeración se observa una mejora de las características físicas del coágulo, por lo que resulta aconsejable retrasar el reparto y distribución durante este tiempo.

Las pautas que deben seguirse para garantizar la calidad hasta el consumidor son:

- Durante el almacenamiento : reducir al máximo la manipulación de los envases, mantener la temperatura a menos de 5°C evitando fluctuaciones de ésta, asegurar una adecuada circulación de aire en las cámaras, proteger el producto envasado en envases transparentes de la luz y esperar un mínimo de 48 h antes de proceder a su distribución comercial.
- Durante el transporte: en zonas cálidas realizar siempre el transporte en vehículos frigoríficos; en zonas templadas, en invierno, es suficiente con que sean isotermos. La agitación que sufre el yogur durante el transporte produce sinéresis y disminuye la viscosidad, por lo que es recomendable evitar grandes desplazamientos.
- En los establecimientos de venta y en los hogares hasta su consumo el yogur debe exponerse o conservarse en vitrinas o cámaras frigoríficas.

4 Inventario

En la fase de inventario deben contarse los diferentes impactos medioambientales del sistema, considerando cada etapa de éste como un subsistema donde hay entradas y salidas de materia, de energía, de agua y emisiones.

Para cada subsistema se debe hacer un inventario de materias primas y auxiliares, las fuentes de energía utilizadas y las emisiones medioambientales referidas a una unidad funcional.

4.1 Sistema estudiado

Las etapas del sistema estudiado están comprendidas desde la recepción de la leche cruda a la fábrica hasta el almacenado del yogur anterior a su distribución a los comercios, sin considerar la fabricación de los materiales de envasado ni de los aditivos, tal como muestra la Ilustración 4.1.

Los subsistemas o etapas que componen el estudio son recepción y almacenamiento de la leche; acondicionamiento de la leche (normalización de la materia grasa, del extracto seco magro y homogeneización); pasteurización de la leche; inoculación del cultivo, envasado e incubación de la leche y finalmente refrigeración, almacenaje y embalaje del yogur.

La unidad funcional es 10.300 kg de yogur natural firme, distribuidos en envases de 125 g.

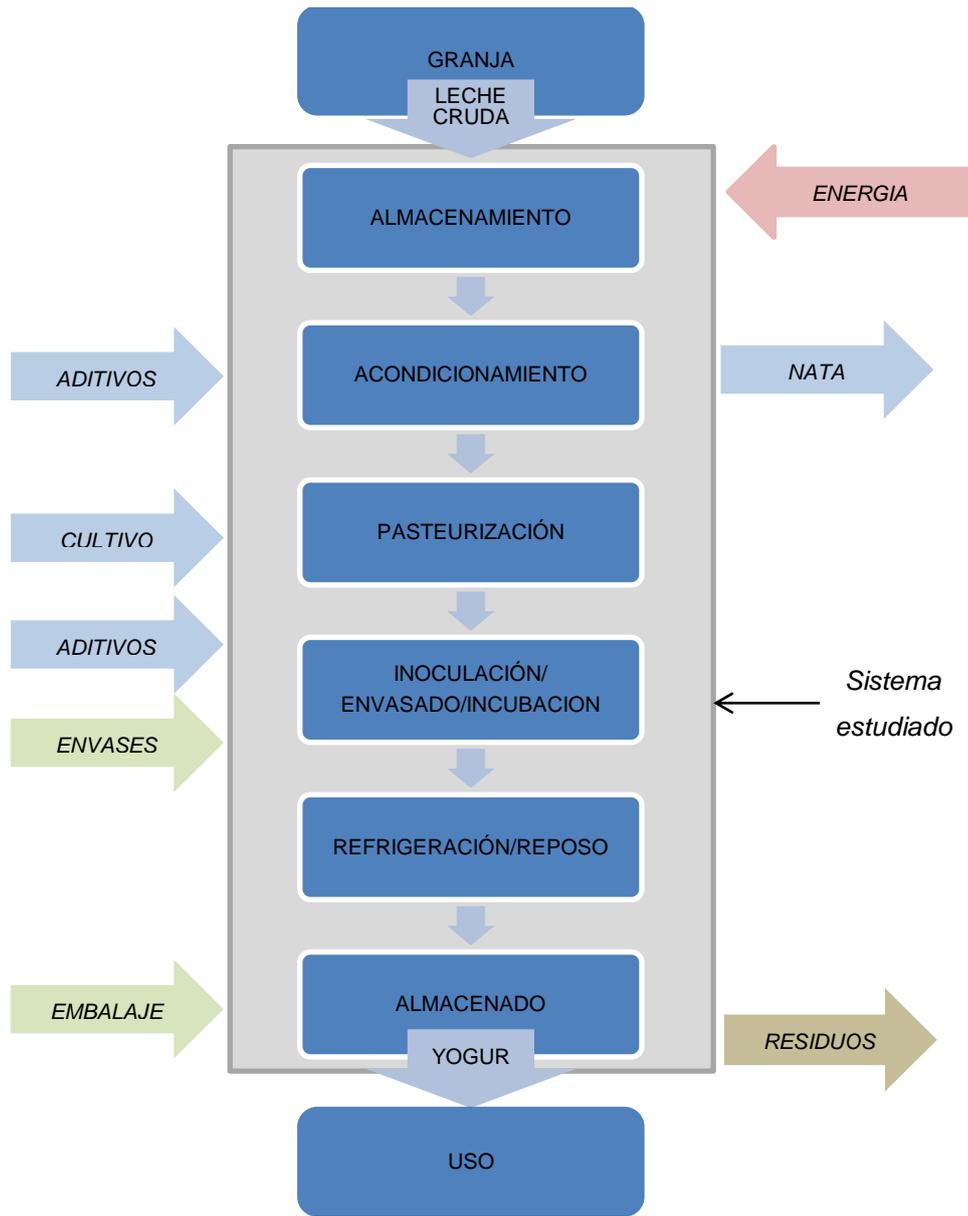


Ilustración 4.1 Diagrama de flujo del sistema estudiado y los subsistemas que lo componen

4.2 Balance de materia

Para realizar el balance de materia hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El producto sujeto de estudio será un yogur natural de tipo tradicional o firme.
- Se determina una calidad de leche cruda promedio a partir de la cual se realizarán los procesos para la obtención del yogur.
- La cantidad y la calidad de producto obtenido, yogur, deben ser iguales en los diferentes métodos de elaboración para que éstos sean comparables al analizar de ciclo de vida del producto.
- Las variaciones del proceso en cuanto a balance material se producen a la hora de la normalización del extracto seco magro de la leche (por evaporación, por adición de productos lácteos en polvo o por ultrafiltración). A partir de la homogeneización de la leche, el proceso es el mismo para todos ellos, por lo que definiendo la cantidad y la calidad de leche homogeneizada, el producto obtenido finalmente es el mismo en todos los casos, y de estos datos habrá que deducir las cantidades iniciales de leche cruda en cada caso.
- La cantidad de leche homogeneizada o pasteurizada sobre la que se basan los cálculos es de 10.000 kg, necesarios para la obtención de 10.300 kg de yogur.

Los datos básicos para los cálculos son:

- Composición de la leche cruda [6]: ver Tabla 4.1.
- Composición de la leche homogeneizada o pasteurizada: ver *Tabla 4.1*
- Composición de la nata [3]: ver *Tabla 4.1*.
- Los sedimentos o fangos de la desnatadora son 1 kg/10.000 L de leche tratada, cuyos principales componentes son grasas hidrolizadas y agua [7]. Por su naturaleza grasa, al hacer el balance, se deducen de la cantidad de nata obtenida.
- No se consideran otras pérdidas de materia por no disponer de datos y depender de diferentes variables

- Concentración por adición: el producto lácteo en polvo más utilizado es la leche desnatada [6], motivo por el cual se estudia el caso de adición de 3-4% [3] de leche en polvo desnatada de composición [6] en *Tabla 4.1*
- Concentración por evaporación: obtención entre 10-25% de agua [3].
- Concentración por ultrafiltración: se obtiene un subproducto, el filtrado, de composición según *Tabla 4.1* [10].
- Cultivo estárter: adición del 3% [3] y realizado a partir de leche desnatada (0,01% MG) con 9-12% ESM e inoculada con una dosis de cultivo concentrado comercial [7].

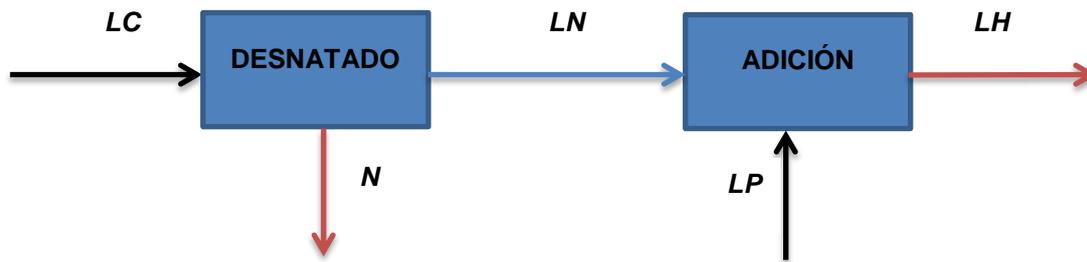
Tabla 4.1 Composición porcentual de los productos que intervienen en la fabricación de yogur

	Símbolo	% MG	% ESM	% Agua
Leche cruda	<i>LC</i>	3,98 %	9,00%	87,02 %
Leche homogeneizada	<i>LH</i>	3,605 %	11,588 %	84,807 %
Nata	<i>N</i>	40,00 %	4,50 %	55,50 %
Leche en polvo desnatada	<i>LP</i>	0 %	97,00 %	3,00 %
Filtrado	<i>F</i>	0 %	5,1%	94,9 %

4.2.1 Balance de materia del acondicionamiento de la leche

4.2.1.1 Balance de materia del proceso de normalización por adición de leche en polvo desnatada

El esquema de este proceso sería el siguiente:



Donde LC es la leche cruda que entra, N es la cantidad de nata que sale del desnatado, LN es la cantidad de leche normalizada en grasa, LP es la cantidad de leche en polvo desnatada que debe añadirse y LH es la cantidad de leche que será homogeneizada.

Las ecuaciones para el balance de materia de este proceso son:

- Global: $LC + LP = N + LH$
- MG: $0,0398 LC + 0 = 0,40 N + 360,5$
- ESM: $0,09 LC + 0,97 LP = 0,045 N + 1158,8$
- Sedimentos: $S = LC/10000$
- Desnatado : $LC = N + LN$

De estas ecuaciones deducimos, como muestra el diagrama de flujo de la Ilustración 4.2, que:

- $LC = 9.781,61$ kg de leche cruda
- $N = 72,02$ kg de nata
- $LP = 290,41$ kg de leche en polvo desnatada
- $LN = 9.709,59$ kg de leche entera o normalizada en grasa
- $S = 0,98$ kg de sedimentos que salen de la desnatadora
- La cantidad total de nata que sale del proceso de desnatado es de 71,04 kg
- La adición de leche en polvo es de un 3.0% de la leche entera

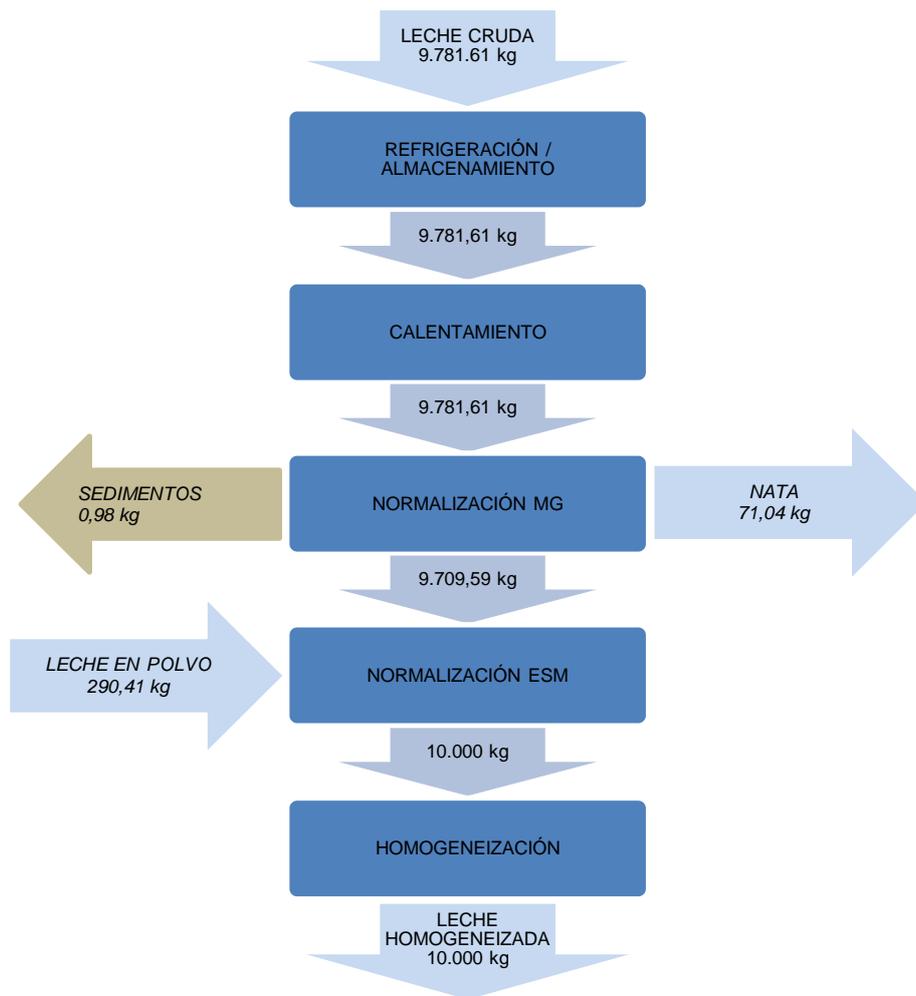
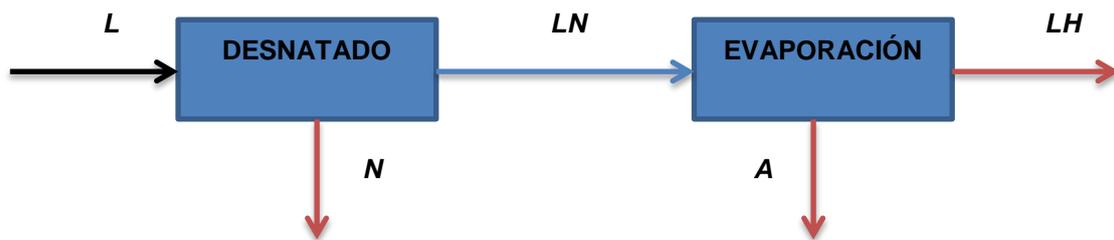


Ilustración 4.2 Diagrama de flujo del acondicionamiento de la leche por adición de leche en polvo

4.2.1.2 Balance de materia para el proceso de normalización por evaporación

El esquema de este proceso lo podemos representar como sigue:



Donde A es el agua que sale por evaporación y el resto de los flujos se denominan igual que en el caso anterior.

Las ecuaciones para el balance de materia de este proceso son:

- Global: $LC = N + A + LH$
- MG: $0,0398 LC = 0,40 N + 360,5$
- ESM: $0.09 LC = 0.045 N + 1158,8$
- Desnatado: $LC = N + LN$
- Sedimentos: $S = LC/10000$

De estas ecuaciones deducimos el diagrama de flujo de la Ilustración 4.3 y los datos:

- $LC = 13.075,43$ kg de leche cruda
- $N = 399,76$ kg de nata
- $A = 2.675,67$ kg de agua
- $LN = 12.675,67$ kg de leche entera
- $S = 1,31$ kg de sedimentos que salen de la desnatadora
- La cantidad final de nata que sale del proceso de desnatado es de 398,45 kg

- El porcentaje de evaporación es del 21,1%

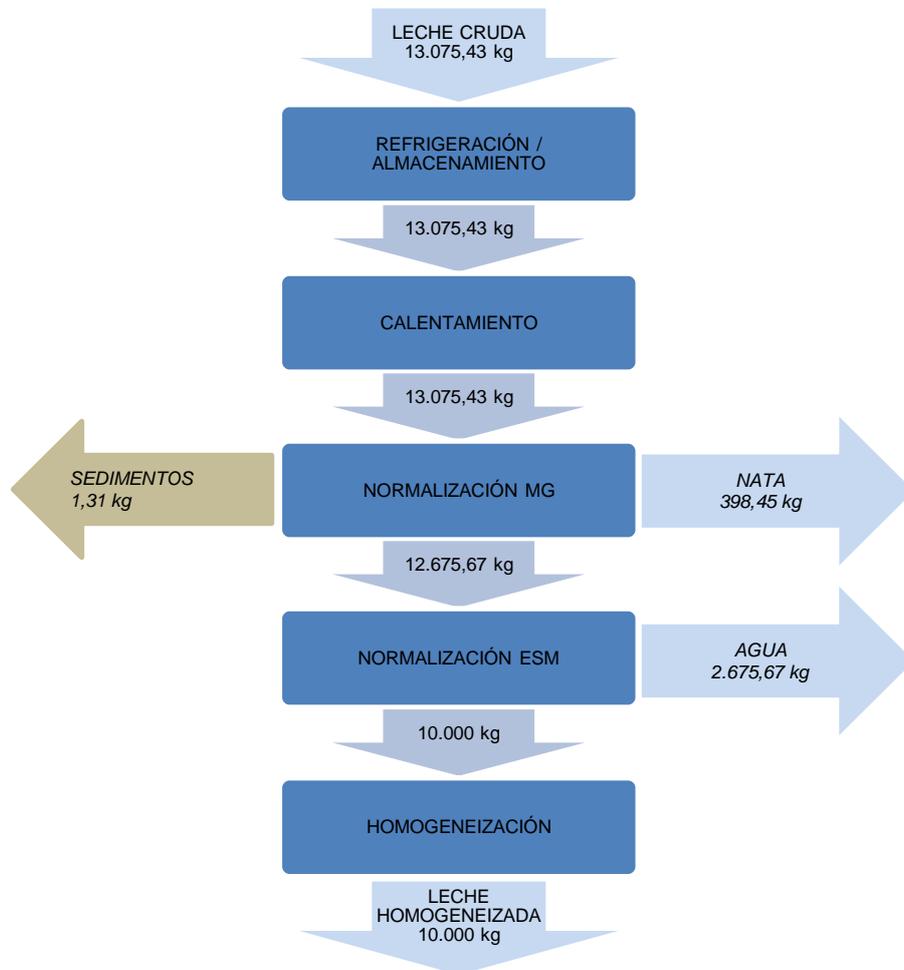
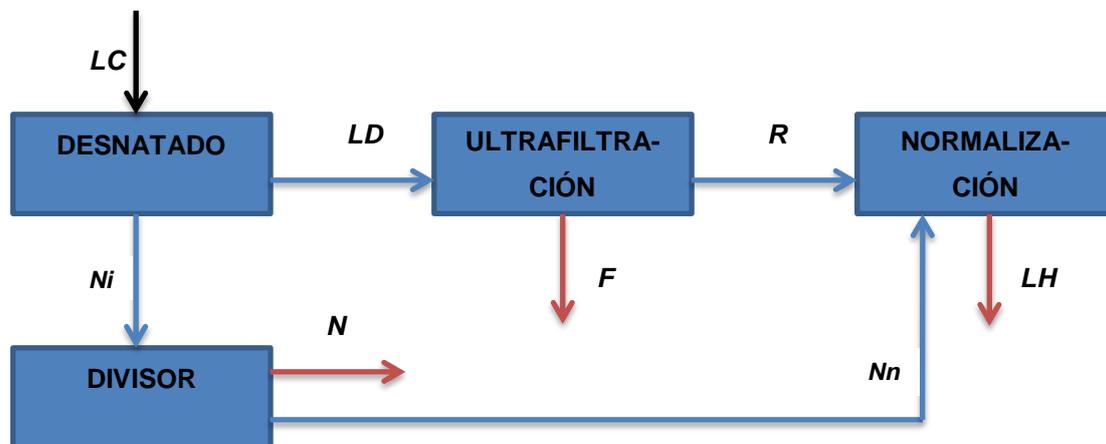


Ilustración 4.3 Diagrama del flujo del acondicionamiento de la leche por evaporación

4.2.1.3 Balance de materia para el proceso de normalización por ultrafiltración

El esquema de las operaciones sería:



Donde LD es la cantidad de leche desnatada y Ni la cantidad de nata que sale del desnatado; R es la cantidad de retenido y F la de filtrado que salen de la ultrafiltración; Nn es la cantidad de nata requerida para ajustar el retenido al contenido graso final.

Conviene realizar la ultrafiltración con leche desnatada, ya que la elevada presión que se genera puede alterar las propiedades físicas de la grasa y la grasa dificulta la filtración. Una vez filtrada la leche, se normaliza el contenido en grasa hasta el valor adecuado añadiéndole parte de la nata extraída en el desnatado. El contenido en grasa considerado de la leche desnatada es del 0,1% [6].

El retenido queda constituido por una concentración de proteínas y macromoléculas y bajo en lactosa. El filtrado contiene principalmente agua, lactosa, sales y vitaminas.

Las ecuaciones del balance de materia son:

- Global: $LC = N + F + 10000$

-
- MG: $0,0398 LC = 0,40 N + 0 F + 360,5$
 - ESM: $0,09 LC = 0,045 N + 0,051 F + 1158,8$
 - Desnatado: $LC = Ni + LD$
 - MG desnatado: $0,0398 LC = 0,40 Ni + 0,001 LD$
 - ESM desnatado: $0,09 LC = 0,045 Ni + \frac{m}{100} LD$
 - Ultrafiltración: $LD = R + F$
 - MG ultrafiltración: $0,1 LD = g R$
 - ESM ultrafiltración: $m LD = 0,051 F + s R$
 - Normalización: $R + Nn = 10000$
 - Sedimentos: $S = C/10000$

Los resultados obtenidos son, como puede verse en la Ilustración 4.4:

- $LC = 16.521,64$ kg de leche cruda
- $N = 742,65$ kg de nata a la salida del proceso, sin descontar sedimentos
- $F = 5.778,99$ kg de filtrado
- $Ni = 1.606,62$ kg de nata a la salida del desnatado, sin descontar los sedimentos
- $LD = 12.675,67$ kg de leche desnatada
- $m = 9,48\%$ ESM de la leche desnatada
- $Nn = 863,96$ kg de nata necesarios para normalizar la leche desnatada
- $R = 9136,04$ kg de retenido en la ultrafiltración
- $g = 0,16\%$ MG del retenido
- $s = 12,26\%$ ESM del retenido
- $S = 1,65$ kg de sedimentos que salen de la desnatadora
- La cantidad final de nata obtenida es de $741,00$ kg
- El porcentaje de retención es del $61,3\%$ de la leche desnatada

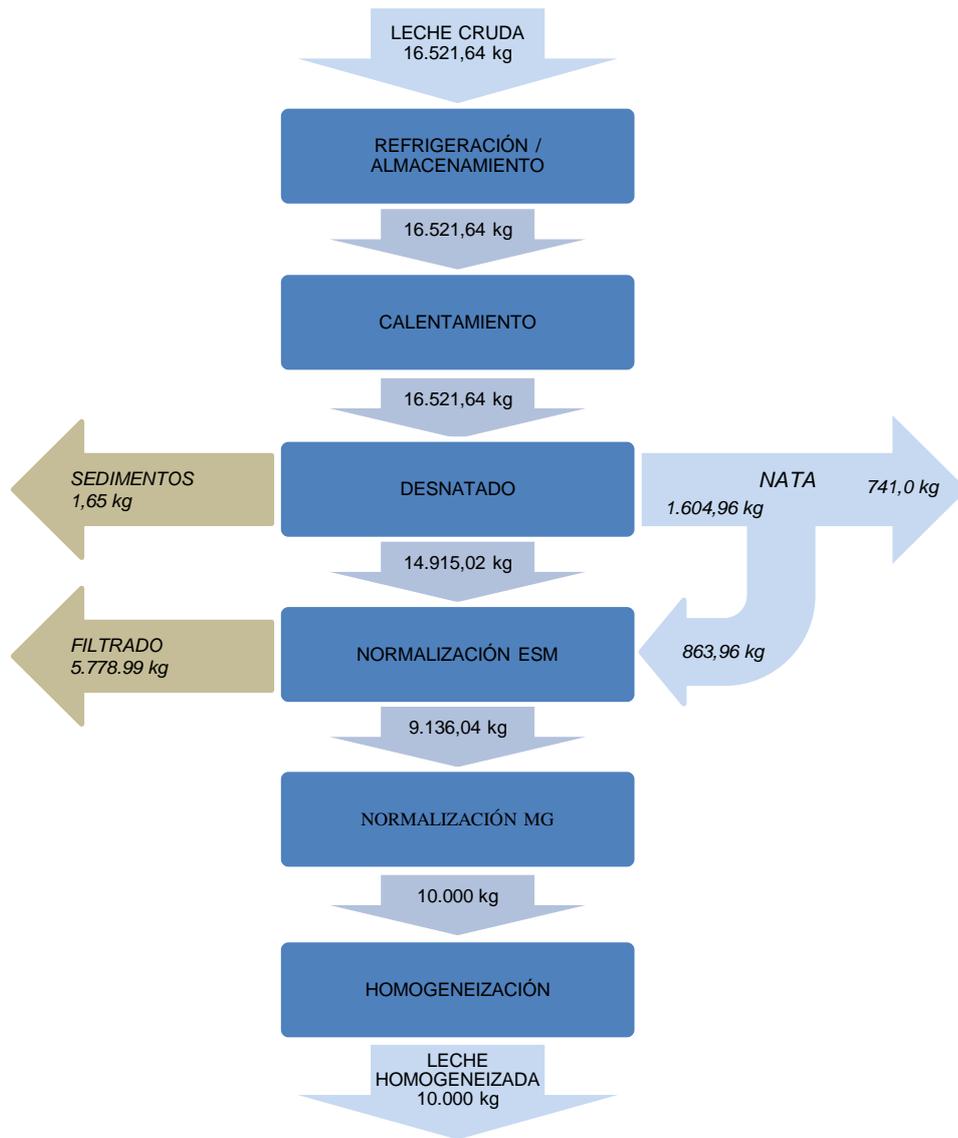


Ilustración 4.4 Diagrama de flujo del acondicionamiento de la leche por ultrafiltración

4.2.2 Balance de materia del subsistema pasteurización / inoculación

Tras la homogeneización, la leche es pasteurizada e inoculada con el cultivo estárter (CE), según el diagrama de flujo de la Ilustración 4.5.

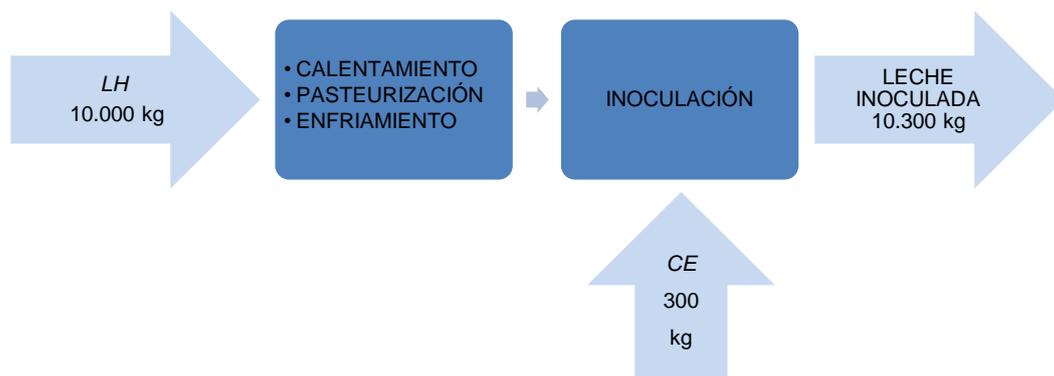


Ilustración 4.5 Diagrama de flujo de las operaciones de pasteurización e inoculación

La cantidad de cultivo estárter es un 3% de la leche pasteurizada, en este caso 300 kg.

El cultivo estárter se obtiene en planta desnatando leche cruda (LC), según la Ilustración 4.6.

Su composición en ESM, la cantidad de leche cruda inicial y la cantidad de nata obtenida vienen definidas por el balance de materia de sus componentes. El contenido en MG de la leche desnatada y por lo tanto del cultivo estárter es del 0,01%. Las ecuaciones serían:

$$- \text{ Leche cruda (LC)} = \text{ Leche desnatada (LD)} + \text{ Nata(N)}$$

- Grasa: $3,98 LC = 0,01 LD + 40 N$
- ESM: $9LC = m LD + 4,5 N$

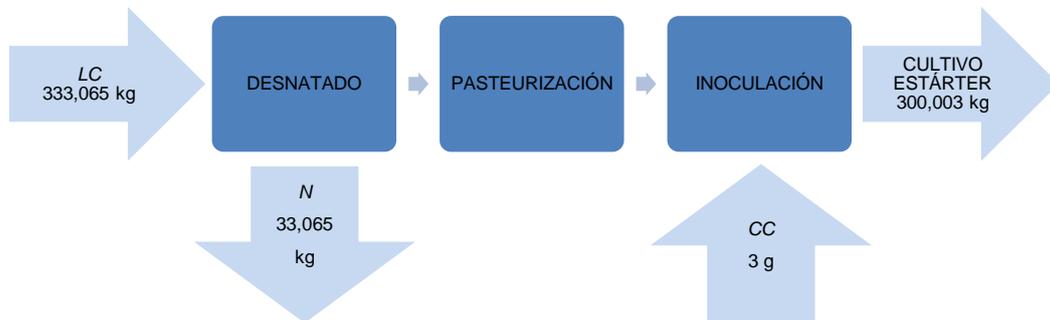


Ilustración 4.6 Diagrama de flujo de la producción del cultivo estárter

De estas ecuaciones deducimos que se necesitan 333,065 kg de leche cruda para preparar el estárter, se obtienen 33,065 kg de nata y el contenido en ESM del cultivo estárter es del 9,50%. La cantidad de cultivo concentrado comercial (CC) que se añade a la leche desnatada es de 3 a 5 g por cada 500 L.

La composición de la leche inoculada obtenida se deduce como sigue:

- Grasa: $3,605 \times 10000 + 0,01 \times 300 = g 1300$
- ESM: $11,588 \times 10000 + 9,50 \times 300 = m 1300$

Teniendo como resultado:

- 3,50% MG
- 11,53% ESM

4.2.3 Balance de materia del subsistema de envasado/incubación

4.2.3.1 Envasado

Una vez la leche ha sido inoculada, se procede a su envasado, donde transcurrirá la fermentación.

Los envases están compuestos por un recipiente, habitualmente de PS, PP o vidrio y una tapa. Pueden incluir una faja o agrupador, habitualmente de cartón, que facilita su manejo y que los agrupa para la comercialización. Los envases de PS pueden incluir una banderola de papel impreso, que da consistencia al envase, reduce el paso de la luz al producto o mejora la estética del envase.

Se necesitan 82.400 recipientes con una capacidad de 125 g para envasar el yogur obtenido. El material de los recipientes estudiados es vidrio y PS.

Los recipientes de PS se realizan en la máquina de envasado por termoformación a partir de unas láminas o bobinas, se les aplica la banderola por termosellado, son llenados con la leche inoculada, tapados (las tapas o flexibles, también en bobinas, se termosellan al recipiente), y finalmente se dividen agrupando varias unidades según el formato de comercialización. En este caso no se incluyen fajas.

Los recipientes de vidrio entran ya formados en la máquina de envasado. Tras su llenado son tapados con cápsulas de aluminio troqueladas mediante termosellado y enfajados en grupos de dos unidades.

En la *Tabla 4.2* y la *Tabla 4.3* se encuentra la descripción de cada envase individual considerado y la cantidad necesaria.

Una vez envasado el yogur, los envases se disponen en cajas de cartón y éstas en palés para entrar en el horno de fermentación. Las cajas propuestas contienen 24 unidades y su peso en vacío es 150 g. En la *Tabla 4.4* se describe la cantidad de cajas necesarias, su peso y su distribución en palés reutilizables de madera. Aunque se enumeran datos de ca-

jas de PE-PP, no se incluirán en la evaluación al no disponer del número de reutilizaciones de éstas, se considerarán sólo cajas de cartón.

Tabla 4.2 Componentes del envase de PS

Envase	Material	Peso unitario	Unidades/formato	Cantidad
Recipiente	PS	4,50 g	4 unidades/grupo	370,8 kg
Banderola	Papel impreso	0,60 g		49,44 kg
Tapa	Papel/PET metalizado	0,26 g		21,42 kg
Faja	-			

Tabla 4.3 Componentes del envase de vidrio

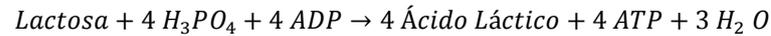
Envase	Material	Peso unitario	Unidades/formato	Cantidad
Recipiente	Vidrio	89,00 g	2 unidades/grupo	7333,6 kg
Banderola	-			41,2 kg
Tapa	Aluminio	0,50 g		
Faja	Cartón	5,50 g	1	226,6 kg

Tabla 4.4 Recuento de las cajas y palés necesarios para el embalaje

Cajas de cartón [11]	150 g/caja	24 unidades/caja
24 unidades/caja de cartón	3.434 cajas	515,1 kg cartón
18 cajas por capa		
6 capas por palé	108 cajas/palé	
32 palés	2.592 unidades/palé	
Cajas de PP-PE [12]	0,750 kg/caja	
48 unidades/caja PP-PE	1717 cajas	1287,8 kg PP-PE
8 cajas por capa		
11 capas por palé	88 cajas/palé	
20 palés	4.224 unidades/palé	
Palés reutilizables [12]	23,5 kg/palé	40 utilizaciones
32 palés	752 kg de madera	18,8 kg madera/utilización
20 palés	470 kg de madera	11,75 kg madera/utilización

4.2.3.2 Incubación

Durante la incubación se produce la transformación de la lactosa en ácido láctico siguiendo la reacción simplificada [3]:



El contenido en ácido láctico del yogur oscila entre 1,8 y 2,5% [3] y el de lactosa entre 4 y 5% [6]. Si tomamos como contenido final de ácido láctico el promedio de éstas cifras, éste será del 2.1% y la cantidad total de 216,3 kg de ácido láctico.

Según la ecuación de la reacción, de cada 342 g de lactosa digerida se obtienen 360 de ácido láctico y 54 g de agua. Durante la incubación se producen 32,45 kg de agua y se eliminan 205,49 kg de lactosa.

El contenido final del yogur es de 3,5% de MG, 11,2% de ESM y 14,7% de Sólidos Totales.

4.2.4 Balance de materia del subsistema Almacenado yogur-Embalaje

Una vez el yogur ha fermentado, se pasa a la cámara de refrigeración donde se enfría a 4°C. Seguidamente pasa a la cámara de conservación donde continúa el madurado durante dos días, cuando estará listo para su distribución comercial. En ese momento se realiza la operación de enfardado de los palés, que facilitará el transporte.

El enfardado se realiza con film de polietileno. Se estiman unos 300 g de polietileno por cada palé, que suponen 9,6 kg para todo el sistema.

4.2.5 Balance de materia del sistema estudiado

Según el procedimiento empleado para la normalización del contenido no graso, se obtienen diferentes balances de masa, descritos a continuación en la Tabla 4.5, Tabla 4.6, Tabla 4.7 y separado de los envases, que es común a todos ellos, descrito en la Tabla 4.8.

Tabla 4.5 Balance de materia para el método de adición de leche en polvo

PRODUCTO	ENTRADAS	SALIDAS
Leche cruda	10.114,7 kg	
Leche en polvo desnatada	290,4 kg	
Nata		104,1 kg
Yogur		10.300,0 kg
Sedimentos		1,0 kg

Tabla 4.6 Balance de materia para el método de evaporación

PRODUCTO	ENTRADAS	SALIDAS
Leche cruda	13.408,5 kg	
Nata		431,4 kg
Agua		2.675,7 kg
Yogur		10.300,0 kg
Sedimentos		1,3 kg

Tabla 4.7 Balance de materia para el método de ultrafiltración

PRODUCTO	ENTRADAS	SALIDAS
Leche cruda	16.854,7 kg	
Nata		774,0 kg
Filtrado		5.779,0 kg
Yogur		10.300,0 kg
Sedimentos		1,7 kg

Tabla 4.8 Balance de materia de envases y embalajes

TIPO DE ENVASE	MATERIAL	ENTRADAS	SALIDAS
Termoformado	PS	370,8 kg	
	Papel	49,44 kg	
	Papel/PET metalizado	21,42 kg	
Vidrio	Vidrio	7333,6 kg	
	Aluminio	41,2 kg	
	Cartón	226,6 kg	
Caja	Cartón	515,1 kg	
Palé	Madera	752 kg	
Film	Polietileno	9,6 kg	

4.3 Balance de energía

El balance de energía debe dividirse en varias fases. En la primera fase, de adecuación de la leche, habrá tres balances correspondientes a los tres métodos de estandarización y a sus correspondientes balances de materia. La segunda fase corresponde a la pasteurización, en la que se estudiarán tres métodos diferentes. Una tercera fase en la que se compararán dos métodos de incubación junto a la refrigeración, almacenamiento y distribución del yogur.

Para cada fase debe especificarse la naturaleza de la energía, térmica o eléctrica, ya que sus impactos ambientales son diferentes. Como se ve en la Ilustración 4.7, se diferencian así mismo los calentamientos de los enfriamientos: el enfriamiento se produce mediante equipos de refrigeración eléctricos y los calentamientos mediante intercambiadores de calor con agua caliente en la mayoría de los casos (el vapor se usa cuando se superan los 100°C), calentada mediante calderas de gas. Se tiene en cuenta también el aprovechamiento de la energía por regeneración.

Debe especificarse además la energía necesaria para el funcionamiento de la maquinaria (energía mecánica) y las posibles pérdidas energéticas durante el proceso.

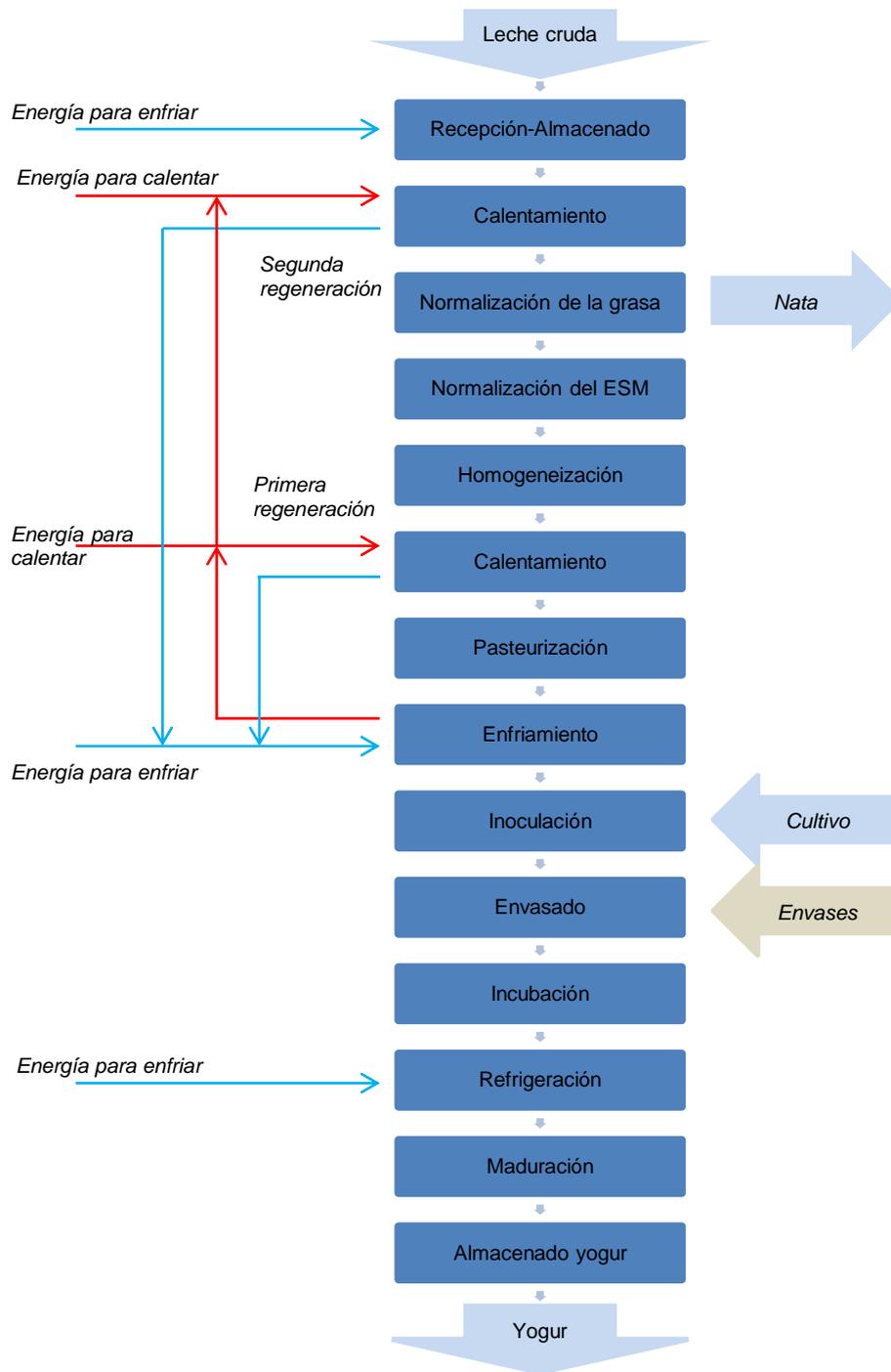


Ilustración 4.7 Diagrama de flujo de la energía de calentamiento/enfriamiento del sistema estudiado

En primer lugar se define la cantidad de calor que debe aplicarse o extraerse para calentar o enfriar el producto, que viene definida por la ecuación:

$$Q = m \times C_e \times \Delta T$$

Donde el calor Q (J) viene determinado por la masa m (g) del producto, su calor específico C_e (J/g·K) y el incremento de temperatura ΔT (K).

El calor específico de la leche y el de la nata varían con la temperatura y su contenido en grasa. Sus valores [13] se exponen en la Tabla 4.9. El calor específico de la leche en polvo desnatada es próximo a 1,256 kJ/kg·°C [13].

Tabla 4.9 Valores del calor específico de la leche y de la nata

C_e (kJ/kg·°C)	0°C	15°C	40°C	60°C
Leche entera	3,852	3,936	3,894	3,852
Leche desnatada	3,936	3,957	3,978	4,019
Nata 30% MG	2,805	4,103	3,559	3,601
Nata 40% MG	2,652	4,201	3,377	3,433
Nata 60% MG	2,345	4,396	3,014	3,098

Para el cálculo de las pérdidas por transmisión de calor en los tanques, las conducciones y la cámara de refrigeración, debe definirse antes la temperatura ambiental. El estudio se sitúa en Catalunya, pero dada la dificultad de definir una temperatura media para todo el territorio por su variedad climática, se ha optado por ubicar la producción en una comarca donde fuera más probable la instalación de una planta de producción de yogur, considerando la proximidad a las zonas de gran producción de leche y a las de mayor densidad de población.

Según el Anuario Estadístico de Cataluña [14], la comarca con mayor producción lechera es Osona. Demográficamente, Osona es la comarca con producción de leche mejor situada.

Los datos de temperatura media anual y de transporte irán referidos por lo tanto a esta comarca.

Según datos del Servei Meteorològic de Catalunya [15], la temperatura media en Osona en los años 1971-2000 es de 12,0°C.

Se considera una temperatura ambiental media de 16°C en el interior de la planta que servirá también como referencia para productos que están a temperatura ambiente.

Para cada fase del proceso deben definirse una serie de premisas, definidas a continuación y el medio de calentamiento o enfriamiento, térmico o eléctrico.

4.3.1 Pérdidas de energía

Las pérdidas de energía se producen por conducción y por convección de los depósitos y conducciones al ambiente. En las cámaras, las pérdidas de energía se producen también por permeabilidad del aire a través de las aberturas y por radiación procedente de la iluminación, la maquinaria o el personal que opera en su interior.

Las pérdidas de energía por conducción y convección producidas entre dos medios a diferente temperatura son función del coeficiente global de transmisión térmica (K) y de la superficie de contacto entre ambos medios (S) y son proporcionales también a la diferencia de temperatura entre los dos medios y al tiempo de contacto o permanencia entre ambos medios según la ecuación:

$$\Delta Q = K \times S \times \Delta T \times \Delta t$$

El coeficiente global de transmisión de calor depende a su vez de la conductividad térmica o coeficiente de conducción de los materiales que separan los dos medios y su espesor; y de la resistencia térmica superficial, que depende, entre otros, del estado de la superficie del material, el tipo y la velocidad de los fluidos y la orientación de la superficie.

En cuanto a la permeabilidad de aire, depende del tamaño de las aberturas, su material y el tiempo que permanecen abiertas.

Al no disponer de un dimensionado de la planta de fabricación ni de su aislamiento térmico para poder realizar el cálculo, las pérdidas energéticas se estiman en un 5% de la energía necesaria para el proceso.

4.3.2 Recepción y almacenamiento de la leche cruda

El RD 1679/1994 establece que en las explotaciones de producción la leche recogida que supere más de dos horas desde el ordeño y con una recogida diaria sea mantenida a una temperatura inferior o igual a 8°C; cuando la recogida no es diaria la temperatura debe ser inferior o igual a 6°C y que durante el transporte hasta los establecimientos de tratamiento la leche mantenga una temperatura inferior o igual a 10°C. Se estima para el proceso una temperatura media de recepción de la leche de 8°C.

Según la misma legislación, tras la recepción debe procederse a la refrigeración hasta su procesado, a una temperatura inferior o igual a 6°C durante un tiempo máximo de 36h, momento en el que debe hacerse un control microbiológico para rechazar para consumo humano la leche que sobrepase una cierta cantidad de gérmenes.

Se definen en 4°C la temperatura de conservación de la leche cruda [7] y un tiempo de permanencia medio de 24 h.

La Tabla 4.10 muestra la cantidad de calor que debe extraerse de la leche cruda para enfriarla. El enfriamiento se realiza en un intercambiador de calor mediante energía eléctrica y el medio refrigerante es agua glicolada.

Tabla 4.10 Balance de energía para la recepción de la leche según el método de normalización del ESM

	Cantidad entrada (kg)	Temperatura entrada	Temperatura salida	Tiempo de permanencia	Calor (kJ)	Procedencia energía
N. por adición						
Recepción	9.781,6	8°C	4°C		-150.711,6	Eléctrica
Almacenamiento	9.781,6	4°C	4°C	24 h		
Pérdidas					7.535,6	Eléctrica
N. por evaporación						
Recepción	13.075,4	8°C	4°C		-201.461,0	Eléctrica
Almacenamiento	13.075,4	4°C	4°C	24 h		
Pérdidas					10.073,1	Eléctrica
N. por ultrafiltración						
Recepción	16.521,64	8°C	4°C		-254.558,8	Eléctrica
Almacenamiento	16.521,64	4°C	4°C	24 h		
Pérdidas					12.727,9	Eléctrica

4.3.3 Normalización de la grasa o desnatado

El desnatado se realiza a 55°C en una centrifugadora [3], para lo cual la leche cruda debe calentarse previamente.

Con el fin de aprovechar la energía, el calentamiento se realiza en intercambiadores de calor donde primero se regenera la energía de la leche que sale del pasteurizador como precalentamiento y luego se acaba de calentar con agua caliente. El calentamiento del agua se realiza en una caldera de gas. La energía necesaria para la operación de desnatado se muestra en la *Tabla 4.11*.

La leche normalizada en materia grasa pasa a la normalización del extracto seco magro.

Tabla 4.11 Balance de energía para el desnatado según el método de normalización del ESM

		Cantidad entrada (kg)	Cantidad salida (kg)	Temperatura entrada	Temperatura salida	Calor (kJ)
N. por adición						
Calentamiento		9.781,6	9.781,6	4°C	55°C	1.948.174,0
Desnatado	leche	9.781,6	9.709,6	55°C	55°C	
	nata		71,0		55°C	
Pérdidas						97.408,7
N. por evaporación						
Calentamiento		13.075,4	13.075,4	4°C	55°C	2.604.186,3
Desnatado	leche	13.075,4	12.675,7	55°C	55°C	
	nata		398,4		55°C	
Pérdidas						130.209,3
N. por ultrafiltración						
Calentamiento		16.521,6	16.521,6	4°C	55°C	3.290.555,6
Desnatado	leche	16.521,6	14.915,0	55°C	55°C	
	nata		1.605,0		55°C	
Pérdidas						164.527,8

La nata obtenida en el desnatado debe ser pasteurizada. Para ello, se puede almacenar primero en un depósito a 63°C durante un tiempo máximo de 4 horas, posteriormente pasteurizar a 80°C durante 5-10 s y finalmente enfriar a 8°C, almacenar y envasar [7].

Parte de la energía del enfriamiento de la nata que sale de la pasteurización se podría aprovechar también mediante regeneración con la nata entrante. La Tabla 4.11 muestra el balance de energía de este proceso para cada método de normalización y el origen de la energía aplicada.

Tabla 4.12 Balance de energía para la pasteurización de la nata según el método de normalización del ESM

	Cantidad entrada (kg)	Cantidad salida (kg)	T entrada	T salida	Calor (kJ)	Fuente de energía
N. por adición						
Calentamiento	71,0	71,0	55°C	63°C	1.951,2	Térmica
					4.146,2	Total cal.
Calentamiento	71,0	71,0	63°C	80°C	2.925,1	Regeneración
					1.221,1	Térmica
Pasteurización	71,0	71,0	80°C	80°C		
					-18.455,7	Total enf.
Enfriamiento	71,0	71,0	80°C	8°C	-1.221,1	Regeneración
					-17.234,6	Eléctrica
Pérdidas calor					304,9	Térmica
Pérdidas frío					922,9	Eléctrica
N. por evaporación						
Calentamiento	398,5	398,5	55°C	63°C	10.943,7	Térmica
					23.255,3	Total cal.
Calentamiento	398,5	398,5	63°C	80°C	16.417,6	Regeneración
					6.837,7	Térmica
Pasteurización	398,5	398,5	80°C	80°C		
					-103.514,6	Total enf.
Enfriamiento	398,5	398,5	80°C	8°C	-16.417,6	Regeneración
					-87.097,0	Eléctrica
Pérdidas calor					1.710,0	Térmica
Pérdidas frío					5.175,7	Eléctrica
N. por ultrafiltración						
Calentamiento	1.605,0	1.605,0	55°C	63°C	44.081,2	Térmica ¹
					43.248,0	Total cal.
Calentamiento	741,0	741,0	63°C	80°C	30.528,0	Regeneración
					12.720,0	Térmica
Pasteurización	741,0	741,0	80°C	80°C		
					-192.506,8	Total enf.
Enfriamiento	741,0	741,0	80°C	8°C	-30.528,0	Regeneración
					-161.978,8	Eléctrica
Pérdidas calor					4.366,5	Térmica
Pérdidas frío					9.625,3	Eléctrica

¹ Del total, 864 kg de nata permanecen en el proceso. La energía de calentamiento correspondiente es 23.729,7 kJ más las pérdidas de calor.

4.3.4 Normalización del extracto sólido magro y homogeneización

Cuando el contenido en sólidos no grasos se aumenta por adición de leche en polvo, el proceso se realiza en tanques de proceso, aislados térmicamente y provistos de agitadores, donde la leche y la leche en polvo desnatada se mezclan. Dicha operación se realiza a 55°C [7] y tiene una duración de 20-30 min, que es el tiempo que necesita la leche en polvo para rehidratarse. Posteriormente debe calentarse hasta 65°C, que es la temperatura óptima de homogeneización, tratamiento en el que la temperatura de la leche se eleva en 5°C [7].

La normalización mediante evaporación se realiza en evaporadores de efecto múltiple. Un evaporador simple consta de un intercambiador de calor para calentar la leche, un separador del vapor de la fase concentrada, una bomba de vacío y un condensador del vapor producido.

La leche se calienta a 90°C. Al reducir la presión del producto, se produce la evaporación de una parte del agua, que absorbe de la leche el calor latente de evaporación. El vapor producido en un efecto se utiliza como medio de calentamiento en el efecto siguiente, que trabaja a una presión y un punto de ebullición cada vez más bajos. Finalmente la leche concentrada sale a 70°C [7]. La energía proporcionada en el enfriamiento de la leche es la necesaria para la evaporación del agua.

En cada efecto se evapora un 3-4% de agua. Del balance de materia deducimos que el porcentaje total de agua evaporada es del 21,1%, por lo que el número de efectos debe ser de 6 ó 7 y en cada efecto la temperatura de ebullición bajará unos 3°C (descenso de la temperatura de la leche, dividido por el número de efectos).

El consumo energético en la evaporación se realiza principalmente en el calentamiento de la leche, la bomba de vacío y en el enfriamiento del vapor en el condensador.

Tras la evaporación se procede a la homogeneización, que en este caso se realiza a 70°C.

En el caso de la ultrafiltración, la leche es previamente desnatada. La temperatura durante el proceso de filtración se mantiene constante gracias a un circuito interno de recirculación

que compensa el ligero aumento de la temperatura durante la operación [7]. Acabada la ultrafiltración de la leche se procede a añadir la nata necesaria para alcanzar el nivel de materia grasa en un depósito de mezcla, posteriormente la leche es calentada a 65°C y finalmente homogeneizada.

Debido a la presión de trabajo, la leche sufre un incremento de 5°C en la homogeneización [7]. La temperatura de salida del homogeneizador es de 70°C para la normalización por adición y por ultrafiltración y de 75°C para la evaporación. La energía para este incremento de temperatura procede de la energía consumida por el homogeneizador, por lo que no se contará a la hora de hacer los balances.

A continuación la leche se calienta hasta la temperatura de pasteurización. Para que los tres métodos de estandarización sean comparables antes de la pasteurización, deben partir de la misma temperatura, por lo que para la normalización por adición y por ultrafiltración se añade un calentamiento hasta 75°C. La *Tabla 4.13* muestra el balance energético para estos procesos y el origen de la energía aplicada.

Tabla 4.13 Balance de energía de la normalización del ESM y homogeneización de la leche

		Cantidad entrada (kg)	Cantidad salida (kg)	T entrada	T salida	Fuente de energía	Calor (kJ)
N. por adición							
Adición	leche	9.709,6	10.000	55°C	55°C		
	leche en polvo	290,4		16°C		Térmica	14.225,4
Calentamiento		10.000	10.000	55°C	65°C	Térmica	385.190,0
Homogeneización		10.000	10.000	65°C	70°C	Mecánica	192.595,0
Calentamiento		10.000	10.000	70°C	75°C	Térmica / regeneración	192.595,0
Pérdidas						Térmica	39.230,3
N. por evaporación							
Calentamiento		12.675,7	12.675,7	55°C	90°C	Térmica	1.708.889,5
Evaporación	leche	12.675,7	10.000	90°C	70°C	Evaporación ²	-770.380,0
	agua		2675,7	90°C	70°C	Evaporación	-224.049,9
Homogeneización		10.000	10.000	70°C	75°C	Mecánica	192.595,0
Pérdidas						Térmica	95.074,2
N. por ultrafiltración							
Ultrafiltración	leche	14.915,0	9.136,0	55°C	55°C		
	filtrado		5.779,0		55°C		
Norm. grasa	leche	9.136,0	10.000	55°C	55.7°C		
	nata	864,0		63°C			
Calentamiento		10.000	10.000	55.7°C	65°C	Térmica	358.566,8
Homogeneización		10.000	10.000	65°C	70°C	Mecánica	192.595,0
Calentamiento		10.000	10.000	70°C	75°C	Térmica / regeneración	192.595,0
Pérdidas						Térmica	37.187,8

² La energía que se obtendría al enfriar la leche se utiliza para evaporar el agua, por lo que no se tendrá en cuenta a la hora de realizar los balances.

4.3.5 Pasteurización

Una vez la leche se ha homogeneizado, se calienta hasta la temperatura de pasteurización.

Pueden considerarse tres métodos de pasteurización, según la temperatura y el tiempo de tratamiento:

- A alta temperatura (HTLT): manteniendo 85°C durante 30 minutos.
- A muy alta temperatura (VHTST): a 90-95°C durante 5-10 minutos. Es el más habitual en la fabricación de yogur [6] y el que servirá de referencia..
- A ultra alta temperatura (UHT): a 120°C durante 2-3 segundos.

Pasado este tiempo la leche es rápidamente enfriada en el intercambiador de calor hasta la temperatura de inoculación y fermentación. El calentamiento de la leche se realiza primero mediante regeneración y después con energía térmica. El enfriamiento mediante regeneración y refrigeración con agua fría. El balance de energía de los diferentes métodos de pasteurización se muestra en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Balance de energía para el proceso de pasteurización a diferentes temperaturas

	Cantidad (kg)	Temperatura entrada	Temperatura salida	Tiempo de permanencia	Calor (kJ)
P. HTLT					
Calentamiento	10.000	75°C	85°C		385.190,0
Pasteurización	10.000	85°C	85°C	30 min	
Enfriamiento	10.000	85°C	42°C		-1.656.317,0
P. VHTST					
Calentamiento	10.000	75°C	92°C		654.823,0
Pasteurización	10.000	92°C	92°C	8 min	
Enfriamiento	10.000	92°C	42°C		-1.925.950,0
P. UHT					
Calentamiento	10.000	75°C	120°C		1.733.355,0
Pasteurización	10.000	120°C	120°C	2,5 s	
Enfriamiento	10.000	120°C	42°C		-3.004.482,0

Cuando la capacidad de pre-tratamiento de la leche difiere de la de envasado en el yogur firme, puede ser necesario almacenar la leche en un depósito pulmón. Para garantizar su conservación debe enfriarse a 5°C [6]. Esto da lugar a dos escenarios de estudio, el primero, en el que la totalidad de la leche pasteurizada es inoculada y envasada; y el segundo en el que una fracción de la leche continúa el mismo proceso y la otra se enfría y almacena hasta su posterior calentamiento e inoculación.

La Tabla 4.15 muestra el balance de energía del segundo escenario para la fermentación a 42°C, que es la más habitual [6], suponiendo que ambas fracciones sean del 50%.

Tabla 4.15 Balance de energía para la refrigeración y almacenamiento previo a la inoculación (Escenario 2)

	Cantidad (kg)	Temperatura entrada	Temperatura salida	Fuente de energía	Calor (kJ)
Enfriamiento	5.000	42°C	5°C	Electricidad	-723.482,0
Almacenamiento	5.000	5°C	5°C		
Calentamiento	5.000	5°C	42°C	Térmica	723.482,0

4.3.5.1 Regeneración

La energía que se recicla por regeneración en dos etapas es la procedente del enfriamiento de la leche pasteurizada, en este caso 1.925.950 kJ según la Tabla 4.14, para el calentamiento de la leche que entra a la pasteurización en la primera regeneración y para el calentamiento de la leche cruda que entra al desnatado en la segunda regeneración, como muestran la *Ilustración 4.8* y la *Ilustración 4.9*. Con la regeneración se reduce la energía necesaria para calentar y enfriar la leche.

La eficiencia de la regeneración (R) en porcentaje puede llegar al 94-95% y se define según la ecuación:

$$R = \frac{T_r - T_i}{T_p - T_i} \times 100$$

Donde T_r es la temperatura conseguida en la regeneración, T_i es la temperatura de entrada y T_p es la temperatura del proceso.

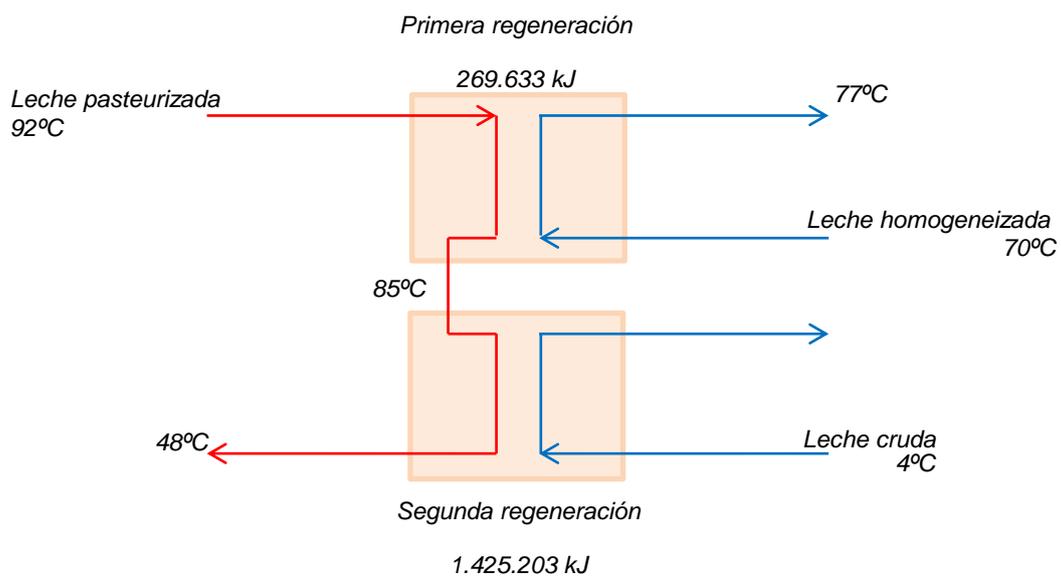


Ilustración 4.8 Esquema de la regeneración

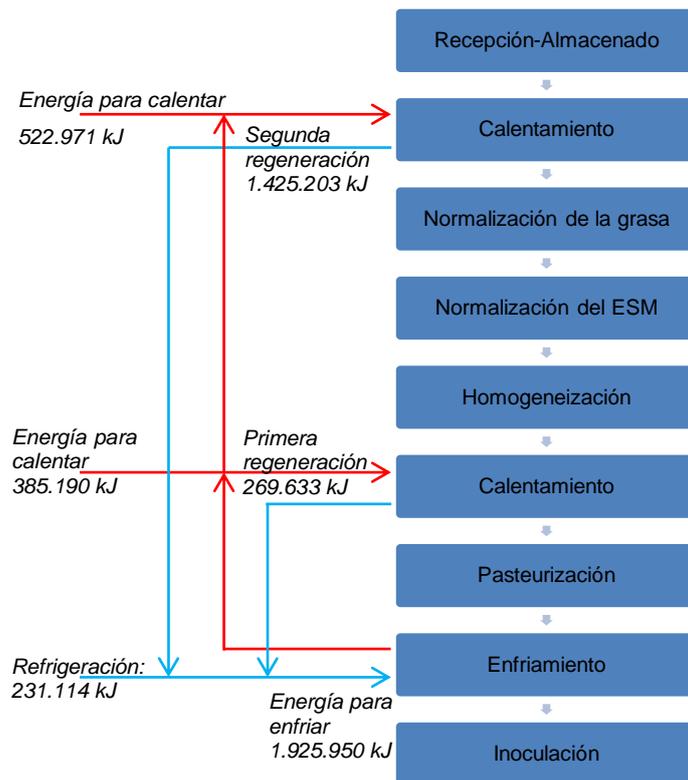


Ilustración 4.9 Diagrama de flujo de la regeneración

La temperatura de salida de la leche pasteurizada, tras la primera regeneración con la leche homogeneizada que entra a la pasteurización es de 85°C, de donde se deduce:

- La energía intercambiada es de 269.633 kJ.
- La temperatura de salida de la leche homogeneizada tras la regeneración es de 77°C. La leche homogeneizada se sigue calentando de 77°C a 92°C con agua caliente.
- La eficiencia de la regeneración es del 32%.

La energía necesaria para calentar la leche a la temperatura de pasteurización es menor que la de enfriamiento. La leche pasteurizada puede seguir en regeneración con la leche

que entra al desnatado, enfriándose así hasta 48°C y acabar enfriándola con agua fría hasta la temperatura de inoculación. Así tenemos:

- La energía disipada en la segunda regeneración con leche cruda es 1.425.203 kJ.
- La energía total reutilizada en las dos regeneraciones es de 1.694.836 kJ.
- La energía para acabar de enfriar la leche pasteurizada a 42°C es 231.114 kJ.
- Se aprovecha un 88% de la energía disponible en la regeneración.

4.3.5.2 Comparación entre diferentes métodos de pasteurización

Para comparar los diferentes métodos de pasteurización debe tenerse en cuenta tanto la energía necesaria, incluida la regeneración, como las pérdidas.

En la pasteurización a 85°C no se hace regeneración con la leche entrante por ser muy pequeño el margen de temperaturas de trabajo, por lo que la regeneración se realiza sólo con la leche cruda que entra a la operación de desnatado, igual que en la pasteurización a 92°C.

En la pasteurización a 120°C la leche que entra al proceso se calienta con vapor en la última etapa, por lo que la primera regeneración se lleva a cabo hasta 98°C. En la segunda regeneración con leche cruda se enfría hasta 53°C. Si la normalización del ESM es por evaporación o por ultrafiltración, podría reducirse más esta temperatura por haber mayor cantidad de leche cruda entrante, con lo que se reduciría el gasto energético para enfriar la leche pasteurizada a 42°C.

Tras la regeneración debe aplicarse energía para acabar de enfriar la leche pasteurizada y para acabar de calentar la leche homogeneizada, como muestra la Tabla 4.16. En este punto es desfavorable la pasteurización a 120°C, mientras que los otros dos métodos dan el mismo resultado.

Tabla 4.16 Comparación de los balances de energía para los diferentes métodos de pasteurización

Temperatura de pasteurización	85°C	92°C	120°C
Tiempo de permanencia	30 min	8 min	2,5 s
E. para calentar	577.785 kJ	847.418 kJ	1.925.950 kJ
E. enfriamiento	-1.656.317 kJ	-1.925.950 kJ	-3.004.482 kJ
E. intercambiada en 1ª regeneración	0 kJ	269.633 kJ	847.418 kJ
T leche pasteurizada tras 1ª regeneración	85°C	85°C	98°C
E. intercambiada en 2ª regeneración	1.425.203 kJ	1.425.203 kJ	1.733.355 kJ
T leche pasteurizada tras 2ª regeneración	48°C	48°C	53°C
E. final calentamiento térmica	577.785 kJ	577.785 kJ	1.078.532 kJ
E. final enfriamiento eléctrica	231.114 kJ	231.114 kJ	423.709 kJ

Suponiendo un mismo dispositivo de pasteurización para todos los casos, las pérdidas de calor serán proporcionales a la diferencia de temperatura entre la leche y el ambiente (16°C) y al tiempo de permanencia de la leche en el proceso, tal y como se muestra en la Tabla 4.17.

Si se tiene en cuenta, que a mayor tiempo de permanencia, el volumen del intercambiador de pasteurización y por lo tanto su superficie, deben ser mayores, la pasteurización a 120°C es la que sufre menos pérdidas de calor durante la operación. La pasteurización a 92°C es ahora más ventajosa que a 85°C, por tener menos pérdidas teniendo ambas la misma necesidad energética según el balance de la Tabla 4.16. Estas pérdidas son poco significativas frente a la energía restante después de la regeneración (el valor del producto $K \times S$ debería ser mucho más elevado de lo habitual para que las pérdidas fueran significativas frente a la energía que se debe seguir aportando).

Tabla 4.17 Pérdidas de calor (J) según el método de pasteurización

Temperatura de pasteurización	85°C	92°C	120°C
ΔQ (J)	$K \times S \times 124200$	$K \times S \times 36480$	$K \times S \times 260$

4.3.6 Inoculación

El cultivo estárter realizado a partir de cultivos concentrados comerciales, congelados o liofilizados, se prepara con anterioridad, normalmente el día anterior para que en el momento de la inoculación contenga la cantidad de microorganismos viables necesarios en fase exponencial de crecimiento.

Esta operación se realiza en tanques especiales donde primero se efectúa el tratamiento térmico de la leche en la que crecerá el cultivo, a 95°C durante 30-45 minutos, después se enfría hasta la temperatura de incubación, 42°-45°C, momento en el que se añade el cultivo concentrado (CC). La incubación se prolonga en el tanque hasta que el pH de la mezcla alcanza un valor próximo a 4,4, durante unas 2,5-3 horas y a continuación se enfría a 5°C para mantener la actividad del fermento [7].

El balance de energía de la preparación del cultivo estárter se recoge en la Tabla 4.18, partiendo de leche cruda a 4°C, suponiendo un tiempo de incubación de 3 h a 42°C y un enfriamiento a 5°C. La leche que sale de la pasteurización se enfría hasta 50°C con la leche que entra al desnatado en regeneración.

La inoculación de la leche con el cultivo estárter, previamente calentado a la temperatura de incubación, se lleva a cabo en tanques de mezcla, tras la cual, la leche es envasada para su fermentación en el envase.

Tabla 4.18 Balance de energía de la preparación del cultivo estéril

	Cantidad entrada (kg)	Cantidad salida (kg)	T de entrada	T de salida	Tiempo de permanencia	Calor (kJ)	Fuente energía
Calentamiento	333,1	333,1	4°C	55°C		67.241,8	Total
Regeneración			4°C	43,5°C		52.000,7	Regeneración
			43,5°C	55°C		15.241,1	Térmica
Desnatado	333,1	300	55°C	55°C			
Calentamiento	300	300	55°C	95°C		48.232,6	Térmica
Pasteurización	300	300	95°C	95°C	40 min		
Enfriamiento	300	300	95°C	42°C		-63.681,2	Total
Regeneración			95°C	50°C		-52.000,7	Regeneración
			50°C	42°C		-11.680,5	Eléctrica
Inoculación	300	300	42°C	42°C			
Incubación	300	300	42°C	42°C	3 h		
Enfriamiento	300	300	42°C	5°C		-43.867,1	Eléctrica
Almacenamiento	300	300	5°C	5°C	24 h		
Calentamiento	300	300	5°C	42°C		43.867,1	Térmica
Total calentamiento						107.340,8	Térmica
Total enfriamiento						55.547,6	Eléctrica
Pérdidas calentamiento						5.367,0	Térmica
Pérdidas enfriamiento						2.777,4	Eléctrica

4.3.7 Envasado

Las propiedades de los materiales empleados en el envasado están descritas en la Tabla 4.19 y la energía para calentarlos a la temperatura de incubación en la Tabla 4.20.

Tras el envasado, los envases se disponen en bandejas o cajas y son paletizados para su traslado a la zona de fermentación.

Tabla 4.19 Calor específico de los materiales de envase

ENVASE	MATERIAL	PESO (kg)	Ce (kJ/kg·°C)	REFERENCIA
Termoformado (a)				
Tarrina	PS	370,80	1,20	[16]
Banderola	Papel	49,44	1,38	[17]
Tapa	Papel	21,42	1,38	[17]
Vidrio (b)				
Tarrina	Vidrio	7.333,60	0,88	[17]
Tapa	Aluminio	41,20	0,879	[17]
Faja	Cartón	226,6	1,57	[17]
Caja o bandeja	Cartón	515,1	1,57	[17]
Palé	Madera	752	2,41	[17]

Tabla 4.20 Balance de energía del calentamiento de los envases y embalajes a la temperatura de incubación (42°C)

Envase	Material	Cantidad (kg)	T entrada	T salida	Calor (kJ)	Fuente energía
Termoformado (a)					14.111,4	Térmica
Tarrina	PS	370,80	16°C	42°C	11.569,0	
Banderola	Papel	49,44	16°C	42°C	1.773,9	
Tapa	Papel	21,42	16°C	42°C	768,5	
Vidrio (b)					177.984,2	Térmica
Tarrina	Vidrio	7.333,60	16°C	42°C	167.792,8	
Tapa	Aluminio	41,20	16°C	42°C	941,6	
Faja	Cartón	226,6	16°C	42°C	9.249,8	
Caja	Cartón	515,1	16°C	42°C	21.026,4	Térmica
Palé	Madera	752	16°C	42°C	47.120,3	Térmica

4.3.8 Incubación

La fermentación o incubación se produce en hornos de fermentación donde se mantienen a 42°C durante 2,5-3 horas o bien a 30°C durante 18h [6]. Al no tener las dimensiones de estos hornos no se puede calcular la energía para calentar el aire que hay en su interior.

4.3.9 Refrigeración y Reposo

Pasado el tiempo de incubación y alcanzado un valor de pH próximo a 4,4-4,5, los yogures se enfrían para detener la fermentación. Los yogures pasan a la cámara de refrigeración donde se enfrían rápidamente hasta 18-20°C, mediante energía eléctrica.

El enfriamiento final a menos de 5°C se realiza en las cámaras de almacenamiento refrigerado donde se mantendrán al menos durante dos días en espera de la distribución. En este punto tampoco se calcula la energía de enfriamiento del aire el interior de las cámaras.

La Tabla 4.21 muestra el balance de energía de la refrigeración del yogur incubado a 42°C. La Tabla 4.22 muestra el balance de energía para la inoculación e incubación a 30°C. Para los cálculos se han tomado los mismos valores del calor específico del yogur que de la leche entera.

Tabla 4.21 Balance de energía de la refrigeración para la incubación a 42°C

Operación		Cantidad (kg)	T entrada	T salida	Calor (kJ)	Pérdidas (kJ)	
Refrigeración	Yogur		10.300	42°C	5°C	-1.530.047,5	76.502,4
	a	Tarrina PS	370,8	42°C	5°C	-16.463,5	1.004,1
		Banderola	49,44	42°C	5°C	-2.524,4	
		Tapa	21,42	42°C	5°C	-1.093,7	
	b	Tarrina vidrio	7.333,6	42°C	5°C	-238.782,0	12.664,3
		Tapa	41,2	42°C	5°C	-1.339,9	
		Faja	226,6	42°C	5°C	-13.163,2	
	Caja		515,1	42°C	5°C	-29.945,4	1.497,3
	Palé		752	42°C	5°C	-67055,8	3.352,8

Tabla 4.22 Balance de energía para la inoculación, la fermentación a 30°C y su refrigeración

		Cantidad (kg)	T entrada	T salida	Fuente energía	Calor (kJ)	
Enfriamiento leche		10.000	42°C	30°C	Eléctrica	-471.434,0	
Calentamiento estérter		300	5°C	30°C	Térmica	29.611,1	
Inoculación		10.300	30°C	30°C			
Envasado	a	Tarrina PS	16°C	30°C	Térmica	6.229,4	
		Banderola				49,44	955,2
		Tapa				21,42	413,8
	b	Tarrina vidrio				7.333,6	90.350,0
		Tapa				41,2	507,0
		Faja				226,6	4.980,7
	Caja	515,1				11.330,7	
	Palé	572				25.372,5	
Incubación			30°C	30°C			
Refrigeración	Yogur		30°C	5°C	Eléctrica	-1.044.470,5	
	a	Tarrina PS				370,8	-11.124,0
		Banderola				49,44	-1.705,7
		Tapa				21,42	-739,0
	b	Tarrina vidrio				7.333,6	-161.339,2
		Tapa				41,2	-905,4
		Faja				226,6	-8.894,1
	Caja	515,1				-20.217,7	
	Palé	572				-45.308,0	

La comparación entre los dos métodos de incubación es semejante a la de la pasteurización. En la Tabla 4.23 se muestran las diferentes necesidades energéticas para ambas fermentaciones desde el enfriamiento de la leche pasteurizada a 42°C, pasando por el envasado en recipientes de PS, hasta la refrigeración del yogur a 5°C. No se tiene en cuenta la energía para calentar y enfriar el aire de las cámaras de incubación y refrigeración.

Las pérdidas de energía que se producen durante la incubación dependen principalmente de la transmisión de calor del horno de fermentación, de su permeabilidad, de las aberturas y el tiempo que permanecen abiertas,... Si los suponemos iguales en ambos métodos, las

pérdidas son proporcionales a la diferencia de temperatura entre el ambiente exterior y el interior del horno y al tiempo de permanencia. Tal como muestra la Tabla 4.24, las pérdidas de energía son del orden de 3,2 veces en la incubación a 30°C frente a 42°C.

Tabla 4.23 Balance de energía comparativo de los dos métodos de incubación en envase termoformado

Temperatura de incubación	30°C		42°C	
	Calentam.	Refriger.	Calentam.	Refriger.
Refrigeración leche		471.434,0 kJ		
Calentamiento estárter	29.611,1 kJ		43.867,1 kJ	
Calentamiento envases	7.598,4 kJ		14.111,4 kJ	
Calentamiento cajas	11.330,7 kJ		21.026,4 kJ	
Calentamiento palés	25.372,5 kJ		47.120,3 kJ	
Tiempo de permanencia	18 h		3 h	
Refrigeración yogur 4°C		1.044.470,5 kJ		1.530.047,5 kJ
Refrigeración envases		13.568,7 kJ		20.081,6 kJ
Refrigeración cajas		20.217,7 kJ		29.945,4 kJ
Refrigeración palés		45.308,0 kJ		67.055,8 kJ
Total	73.912,7 kJ	1.594.998,9 kJ	126.125,1 kJ	1.647.130,3 kJ

Tabla 4.24 Pérdidas de calor según la temperatura de incubación

Temperatura de incubación	30°C	42°C
ΔQ (J)	$K \times S \times 907200$	$K \times S \times 280800$

4.3.10 Almacenado

Tras los dos días de reposo, el yogur ya puede ser comercializado. El yogur debe ser vendido, como máximo, hasta los 28 días siguientes desde la fecha de fabricación y debe ser conservado entre 1°C y 8°C.

A falta de más datos, se estiman unas pérdidas energéticas diarias del 8% respecto a la energía proporcionada para la refrigeración del yogur y un periodo de conservación en almacén hasta su distribución de 3 días después del reposo.

4.3.11 Energía mecánica

Para realizar un cálculo aproximado de la energía que consume la maquinaria durante el proceso, se ha calculado la maquinaria necesaria, cuyos datos se exponen en la *Tabla 4.25* y posteriormente su consumo por proceso en las *Tabla 4.26*, *Tabla 4.27*, *Tabla 4.28* y *Tabla 4.29*.

Tabla 4.25 Características y consumo de la maquinaria para las diferentes operaciones

Proceso	Máquina	Capacidad	Potencia	Fuente
Recepción- Almacenamiento	Bomba	25.000 L/h	5,5 kW	[11]
	Clarificadora	5.000-10.000 L/h	15,5 kW	[18]
	Tanque	12.000 L	5,5 kW	[18]
	Tanque	15.000 L	5,5 kW	
	Tanque	20.000 L	5,5 kW	
Acondicionamiento de la leche	Bomba	20.000 L/h	4,5 kW	[11]
	Desnatadora	5.000-10.000 L/h	22 kW	[18]
	Bomba	20.000 L/h	4,5 kW	[11]
	Mezcladora	20.000 L/h	4,5 kW	[11]
	Tanque de mezcla	12.000 L	5,5 kW	[11]
	Sistema de evaporación	3.500 kg vapor/h	20 kW	[18]
	Sistema de filtración	6.000 L/h	30 kW	
	Homogeneizador	4.000 L/h	30 kW	[11]
Pasteurización- Inoculación	2 Equipos de pasteurización	4.000 L	1,5 kW	[11]
	2 Tanque de mezcla	7.000 L	3 kW	[11]
	Tanque de cultivo	1.000 L	1,1 kW	
	2 bombas	4.000 L/h	5,5 kW	[11]
	Bomba de cultivo	500 L/h	0,75 kW	[11]
Envasado- Incubación	Bomba	4.000 L/h	2,5 kW	[11]
	Termoformadora- Llenadora- Selladora	4.000 L/h	6 kW	[11]
	Agrupadora	4.000 L/h	5,5 kW	[11]
	Cinta transportadora		1,5 kW	[11]
	Horno de incubación		4 kW	[11]
	Cinta transportadora		1,5 kW	[11]
Refrigeración	Cámara de refrigeración		40 kW	[11]
	Cinta transportadora		2 kW	[11]
	Retractilado		0,75	[11]

Tabla 4.26 Consumo eléctrico de la maquinaria para el acondicionamiento de la leche por adición

Proceso	Máquina	Caudal	Potencia (kW)	Tiempo operación	Energía consumida (kWh)
Recepción- Almacenamiento	Bomba	20.000 L/h	5,5 kW	0,5 h	2,8 kWh
	Clarificadora	7.500 L/h	15,5 kW	1,3 h	20,2 kWh
	Tanque	12.000 L	5,5 kW	24 h	132 kWh
	Total recepción				155 kWh
Acondicionamiento de la leche	Bomba	16.000 L/h	4,5 kW	0,6 h	2,7 kWh
	Desnatadora	7.500 L/h	22 kW	1,3 h	28,6 kWh
	Bomba	16.000 L/h	4,5 kW	0,6 h	2,7 kWh
	Mezcladora	16.000 L/h	4,5 kW	0,6 h	2,7 kWh
	Tanque	12.000 L	5,5 kW	0,5 h	2,8 kWh
	Homogeneizador	4.000 L/h	30 kW	2,5 h	75 kWh
	Total acondicionamiento				114,5 kWh

Tabla 4.27 Consumo eléctrico de la maquinaria para el acondicionamiento de la leche por evaporación

Proceso	Máquina	Caudal	Potencia	Tiempo operación	Energía consumida
Recepción- Almacenamiento	Bomba	20.000 L/h	5,5 kW	0,7 h	3,9 kWh
	Clarificadora	7.500 L/h	15,5 kW	1,7 h	26,4 kWh
	Tanque	15.000 L	5,5 kW	24 h	132 kWh
	Total recepción				162,3 kWh
Acondicionamiento de la leche	Bomba	16.000 L/h	4,5 kW	0,8 h	3,6 kWh
	Desnatadora	7.500 L/h	22 kW	1,7 h	37,4 kWh
	Sistema Evaporación	3.500 kg vapor/h	20 kW	0,8 h	16 kWh
	Homogeneizador	4.000 L/h	30 kW	2,5 h	75 kWh
	Total acondicionamiento				132 kWh

Tabla 4.28 Consumo eléctrico de la maquinaria para el acondicionamiento de la leche por ultrafiltración

Proceso	Máquina	Caudal	Potencia	Tiempo operación	Energía consumida
Recepción- Almacenamiento	Bomba	20.000 L/h	5,5 kW	0,8 h	4,4 kWh
	Clarificadora	7.500 L/h	15,5 kW	2,2 h	34,1 kWh
	Tanque	20.000 L	5,5 kW	24 h	132 kWh
	Total recepción				170,5 kWh
Acondicionamiento de la leche	Bomba	16.000 L/h	4,5 kW	1 h	4,5 kWh
	Desnatadora	7.500 L/h	22 kW	2,2 h	48,4 kWh
	Sistema filtración	6.000 L/h	30 kW	2,5 h	75 kWh
	Homogeneizador	4.000 L/h	30 kW	2,5 h	75 kWh
	Total acondicionamiento				202,9 kWh

Tabla 4.29 Consumo eléctrico de la maquinaria desde pasteurización hasta refrigeración

Proceso	Máquina	Caudal	Potencia	Tiempo operación	Energía consumida
Pasteurización	2 Equipos pasteurización	4.000 L	1,5 kW	3 h	9 kWh
	2 bombas	4.000 L/h	5,5 kW	3 h	33 kWh
	Total pasteurización				42 kWh
Inoculación- Envasado- Incubación	2 Tanque de mezcla	7.000 L	3 kW	1 h	6 kWh
	Tanque cultivo	1.000 L	1,1 kW	24 h	26,4 kWh
	Bomba cultivo	500 L/h	0,75 kW	8 h	6 kWh
	Bomba	4.000 L/h	2,5 kW	2,6 h	6,5 kWh
	Termoformadora- Llenadora-Selladora	4.000 L/h	6 kW	2,6 h	15,6 kWh
	Agrupadora	4.000 L/h	5,5 kW	2,6 h	14,3 kWh
	Cinta transportadora		1,5 kW	2,6 h	3,9 kWh
	Horno de incubación		4 kW	6 h	24 kWh
	Cinta transportadora		1,5 kW	3,5 h	5,3 kWh
	Total inoculación- envasado- incubación				108 kWh
Refrigeración a Almacenado	Cinta transportadora		2 kW	4 h	8 kWh
	Retractilado		0,75	4 h	3 kWh
	Total refrigeración- almacenado [11]				11 kWh

4.3.12 Operaciones de limpieza

El proceso de fabricación del yogur requiere unas condiciones higiénicas muy elevadas y por ello se realizan limpiezas diarias de todas las instalaciones. Para ello se procede primero a una limpieza para eliminar los restos de leche o yogur de los equipos de procesado y posteriormente a una desinfección para eliminar la mayoría de microorganismos residuales. El método de limpieza habitual en la industria láctea es el sistema CIP.

Cuanto mayor es el tratamiento térmico aplicado a la leche, mayor es la adhesión de los residuos, por lo hay dos tipos de programa para la limpieza CIP que se realizan diariamente:

- Para la limpieza de equipos de tratamiento de superficies frías, se realiza primero un enjuagado con agua caliente, seguidamente se trata con una solución alcalina (0,5-1,5% de NaOH), se realiza otro enjuagado con agua caliente y se desinfecta con agua a 90°-95°C, finalmente, excepto los tanques, se enfría con agua de la red.
- Para la limpieza de equipos con tratamientos calientes primero se realiza un enjuagado con agua caliente, seguidamente se trata con una solución alcalina (0,5-2% y en el caso de los evaporadores hasta el 5%), se enjuaga con agua caliente y se hace circular una solución caliente de ácido nítrico al 0,5-1%, que sirve además como desinfectante, después se enjuaga con agua fría. En el caso de los pasteurizadores, antes de comenzar la producción, se realiza una desinfección con agua a 90-95°C.

Junto con la sosa cáustica pueden emplearse detergentes como agentes secuestrantes, emulsionantes, jabones y antiespumantes. Semanalmente se pueden realizar desinfecciones con agua oxigenada a 1500 ppm. Este proceso no será tenido en consideración.

La *Tabla 4.30* resume las cantidades diarias de agua y detergentes requeridas para la limpieza y desinfección de las instalaciones. La *Tabla 4.31* resume el gasto energético diario que suponen las operaciones de limpieza, suponiendo un calor específico del agua y de las soluciones de detergentes de 4,184 kJ/kg·K. Para una producción diaria de 10.300 kg de yogur, los datos de consumo de la *Tabla 4.31* son los de unidad funcional del sistema.

Tabla 4.30 Consumo en agua y detergentes en las operaciones de limpieza diaria [11]

Producto	Temperatura	Volumen
Agua fría	12°C	14 m ³
Agua caliente	80°C	2,1 m ³
Sosa 3%	80°C	2,1 m ³
Acido nítrico 1,5%	30°C	1,4 m ³

Tabla 4.31 Consumo energético de las operaciones de limpieza [11]

Operación	Energía necesaria	Pérdidas (5%)	Energía térmica consumida
Calentamiento agua	597.475 kJ	29.873,8 kJ	627.348,8 kJ
Calentamiento sosa	597.475 kJ	29.873,8 kJ	627.348,8 kJ
Calentamiento ácido	105.436 kJ	5.271,8 kJ	110.707,8 kJ
Total energía térmica en limpieza			1.365.405,4 kJ
Operación	Potencia	Tiempo operación	Energía eléctrica consumida
Bomba agua fría	3,5 kW	4 h	14 kWh
Bomba agua caliente	0,5 kW	3 h	1,5 kWh
Bomba sosa	5,5 kW	3 h	16,5 kWh
Bomba ácido	5,5 kW	3 h	16,5 kWh
Bomba agua recuperada	5,5 kW	3 h	16,5 kWh
Total energía eléctrica en limpieza			65 kWh

4.3.13 Sistema de calefacción

El calentamiento de la leche se produce en intercambiadores de calor, donde el medio de calentamiento es agua calentada en una caldera de gas natural.

Se consideran unas pérdidas de calor en el proceso de intercambio del 5% y un rendimiento de la caldera de 0,88 [19], por lo que a la energía útil de calentamiento de cada proceso, habrá que sumarle las pérdidas y dividir el resultado por el rendimiento para obtener la energía necesaria de cada proceso.

El consumo eléctrico aproximado para el trasiego del agua del sistema de calefacción es de 27 kWh [11], repartidos de una forma proporcional al consumo de energía térmica:

- Acondicionamiento: 9,5 kWh
- Pasteurización: 3 kWh
- Inoculación: 1 kWh
- Limpieza: 13,5 kWh

4.3.14 Sistemas de refrigeración

Se necesitan tres sistemas de enfriamiento para la producción de yogur. El primero es para enfriar la leche cruda mediante intercambiadores de calor donde el medio refrigerante es agua con un 30% de etilenglicol. En el segundo, la leche pasteurizada se enfría en intercambiadores mediante agua. En el tercero se enfría y conserva el yogur en cámaras mediante evaporadores de aire.

Al igual que en la calefacción, se considera un 5% de pérdidas en el proceso de intercambio. El rendimiento del sistema depende de los elementos seleccionados. El coeficiente de operación (COP) es la relación entre el efecto refrigerante (potencia frigorífica en kW térmicos) y el trabajo efectuado (potencia absorbida en kW eléctricos).

Los datos necesarios para cada sistema de refrigeración están en la *Tabla 4.32*.

Tabla 4.32 Potencias de los equipos de frío [20]

Producto a enfriar	Temperatura de salida del agua	Potencia frigorífica	Potencia absorbida	COP
Leche cruda	-4°C	63,7 kW	37,0 kW	1,72
		71,8 kW	42,0 kW	1,71
		100,6 kW	56,2 kW	1,79
Leche pasteurizada	12/7°C	122 kW	45,9 kW	2,66
Yogur	-4°C	199 kW	119 kW	1,67

4.3.15 Asignación de cargas

Durante el tratamiento de la leche para la obtención de yogur se obtiene además otro producto, la nata en la operación de desnatado. En estos casos, el impacto ambiental debe distribuirse entre los productos obtenidos.

La nata se separa de la leche tras las operaciones de recepción, almacenamiento, calentamiento y desnatado. De esta manera, el impacto producido en estas operaciones debe distribuirse entre la leche y la nata.

La distribución de cargas, en este caso asociado al consumo energético, se hace en función de la masa obtenida de cada producto. Así, el consumo energético asignado a cada producto será proporcional a la cantidad de producto obtenido en la operación de desnatado.

Para cada procedimiento de normalización del ESM la cantidad de nata obtenida es diferente, según la *Ilustración 4.2*, *Ilustración 4.3* e *Ilustración 4.4*. La *Tabla 4.33* expone la proporción en tanto por ciento entre nata y leche cruda para cada procedimiento. La cantidad de energía consumida en las operaciones hasta el desnatado, atribuible a la nata, seguirá la misma proporción. El resto de la energía es atribuible al yogur.

Para los otros subproductos obtenidos en la normalización de ESM, agua y filtrado, la asignación de cargas corresponde por completo al yogur.

Tabla 4.33 Proporción nata/leche para la asignación de cargas según el procedimiento de normalización del ESM

Procedimiento	Leche cruda(kg)	Nata (kg)	Nata/Leche cruda	Yogur/Leche cruda
Adición leche en polvo	9.781,61	71,04	0,73%	99,27%
Evaporación	13.075,43	398,45	3,05%	96,95%
Ultrafiltración	16.521,64	741,00	4,49%	95,51%

4.3.16 Resumen

El balance final de energía se divide en tres (Tabla 4.34, Tabla 4.35 y Tabla 4.36 con sus respectivos diagramas de flujos en Ilustración 4.10, Ilustración 4.11 e Ilustración 4.12), para comparar los tres procesos de normalización del ESM, en los que, en los tres casos, la pasteurización es a 92°C y la fermentación se produce a 42°C, por ser éstas las más habituales.

En estas tablas, la energía de calentamiento es el calor que debe proporcionarse al sistema mediante la caldera de gas. El origen de la energía para enfriar es eléctrico, al igual que la energía mecánica para el funcionamiento de la maquinaria. Para obtener el consumo de energía eléctrica de la refrigeración (kWh), primero expresamos el consumo (originalmente en kJ) en kWh y finalmente dividimos el resultado por el coeficiente de operación. Las pérdidas están marcadas con una letra, *T* cuando se compensan con energía térmica y *E* con energía eléctrica. La columna de energía mecánica expresa el consumo total en energía eléctrica del proceso. Se han resaltado las filas en color para resaltar subtotales y en color más oscuro para resaltar los totales de cada sistema (energía más pérdidas).

Tabla 4.34 Balance de energía si la normalización es por adición de leche en polvo

Proceso	Energía para calentar (kJ)	Energía para enfriar (kJ)	Pérdidas (kJ) E ó T	Energía mecánica (kWh)
Recepción-Almacenado		150.711,6	7.535,6 E	155
E. Refrigeración			7912,36 E	27
Total Almacenado leche		166.159,4		182
Carga del yogur en Recepción-Almacenado leche		164.946,4		181
Normalización grasa	1.948.174,0		97.408,7 T	
Regeneración 2ª	-1.425.203,0			
Carga del yogur	519.153,3		96.697,6 T	
Normalización ESM	14.225,4		39.230,3 T	
Homogeneización	577.785,0			
Suma adecuación leche	1.111.163,7		135.927,9 T	115
Calefacción			62.354,6	10
Total Adecuación leche	1.309.446,2			124
Pasteurización	654.823,0	1.925.950	32.741,2 T	
Regeneración 1ª	-269.633,0		96.297,5 E	
Total regeneración		-1.694.836		
Suma Pasteurización	385.190,0	231.114	32.741,2 T 96.297,5 E	42
Calefacción			20.896,6 T	3
E. Refrigeración			16.370,6 E	36
Total Pasteurización	438.827,8	343.782,1		81
Inoculación	107.340,8	55.547,6	5.367,0 T 2.777,4 E	
Envasado-Incubación	35.137,8		1.756,9 T	
Suma Inoculación-Envasado-Incubación	142.478,6	55.547,6	7.123,9 T 2.777,4 E	108
Calefacción			7.480,1 T	1
E. Refrigeración			2.916,3 E	6
Total Inoculación-Envasado-Incubación	157.082,6	61.241,3		115
Refrigeración yogur		1.580.074,5	79.003,8 E	276 11
Reposo			252.811,9 E	42
E. Refrigeración			82.953,9 E 12.640,6 E	16
Total Refrig.-Reposo		2.007.484,7		345
E. Refrigeración			379.217,9 E 18.960,9 E	66
Total Almacenado yogur			398.178,8 E	66
Limpieza	1.365.405,4			65
Calefacción			68.270,3 T	14
Total Limpieza	1.433.675,7			79
Total Proceso	3.339.031,9	2.976.846,3		990 kWh

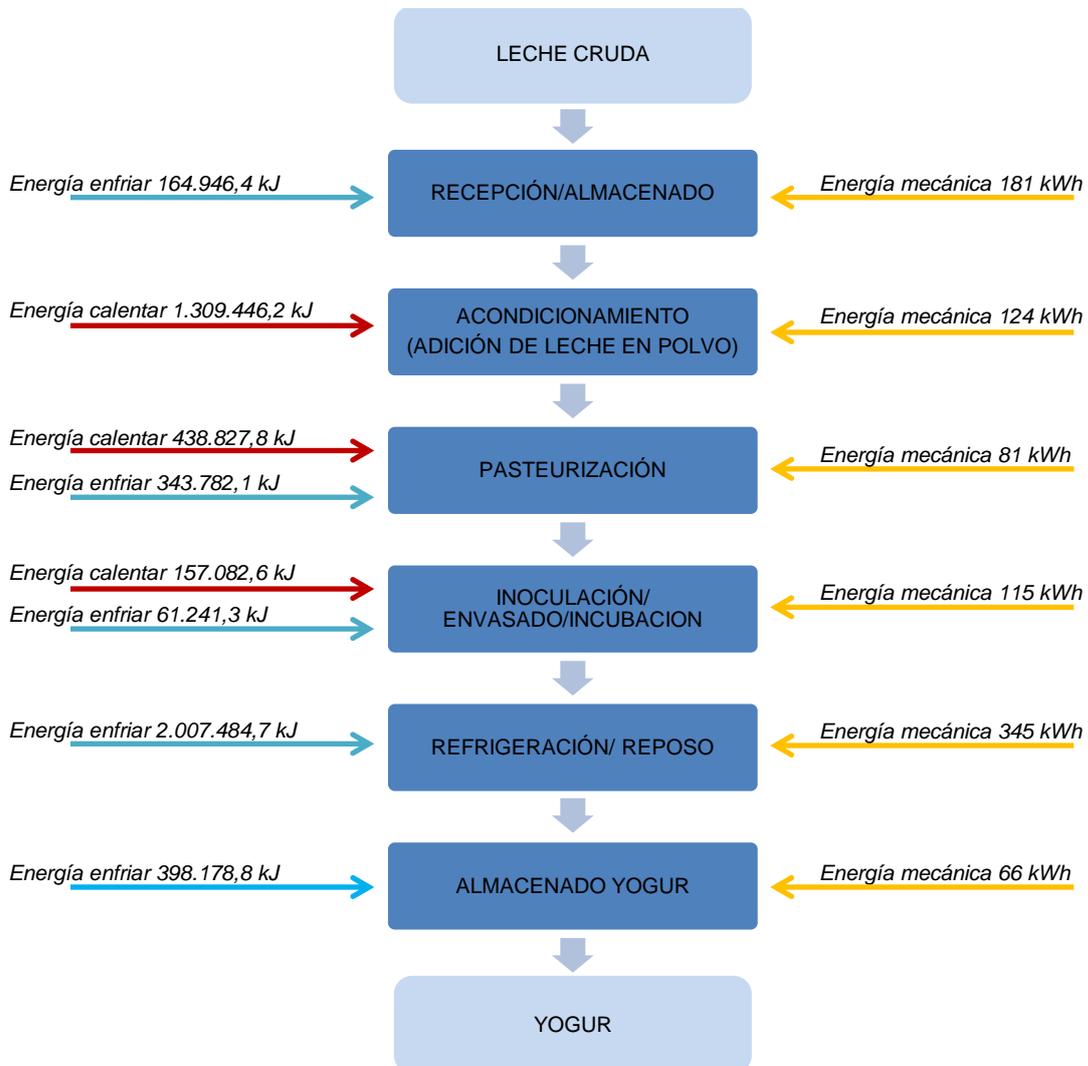


Ilustración 4.10 Diagrama de flujo de la energía aportada al sistema si la normalización es por adición

Tabla 4.35 Balance de energía si la normalización es por evaporación

Proceso	Energía para calentar (kJ)	Energía para enfriar (kJ)	Pérdidas (kJ) E ó T	Energía mecánica (kWh)
Recepción-Almacenado		201.461,0	10.073,1 E	162,3
Refrigeración			10.576,7 E	36,1
Total Recep.-Alm. leche		222.110,8		198,4
Carga del yogur en Recepción-Almacenado leche		215.336,4		192,3
Normalización grasa	2.604.186,3		130.209,3 T	
Regeneración 2ª	-1.425.203			
Carga del yogur	1.143.024,3		126.237,92	
Normalización ESM	1.708.889,5		95.074,2 T	
Homogeneización				
Suma adecuación leche	2.851.913,8		221.312,1 T	132,0
Calefacción			153.661,3 T	9,5
Total Adecuación leche	3.226.887,2			141,5
Pasteurización	654.823	1.925.950	32.741,2 T	
Regeneración 1ª	-269.633		96.297,5 E	
Total regeneración		-1.694.836		
Suma Pasteurización	385.190	231.114	32.741,2 T 96.297,5 E	42,0
Calefacción			20.896,6 T	3,0
Refrigeración			16.370,6 E	35,9
Total Pasteurización	438.827,8	343.782,1		80,9
Inoculación	107.340,8	55.547,6	5.367,0 T 2.777,4 E	
Envasado-Incubación	35.137,8		1.756,9 T	
Suma Inoculación-Envasado-Incubación	142.478,6	55.547,6	7.123,9 T 2.777,4 E	108,0
Calefacción			7.480,1 T	1,0
Refrigeración			2.916,3 E	6,4
Total Inoculación-Envasado-Incubación	157.082,6	61.241,3		115,4
Refrigeración yogur		1.580.074,5	79.003,8 E	276 11
Reposo			252.811,9 E	42,1
E. Refrigeración			82.953,9 E 12.640,6 E	15,9
Total Refrigeración-Reposo		2.007.484,7		344,9
E. Refrigeración			379.217,9 E 18.960,9 E	66,2
Total Almacenado yogur			398.178,8	66,2
Limpieza	1.365.405,4			65
Calefacción			68.270,3 T	14
Total Limpieza	1.433.675,7			79
Total Proceso	5.256.472,9	3.032.797,7		1019,8

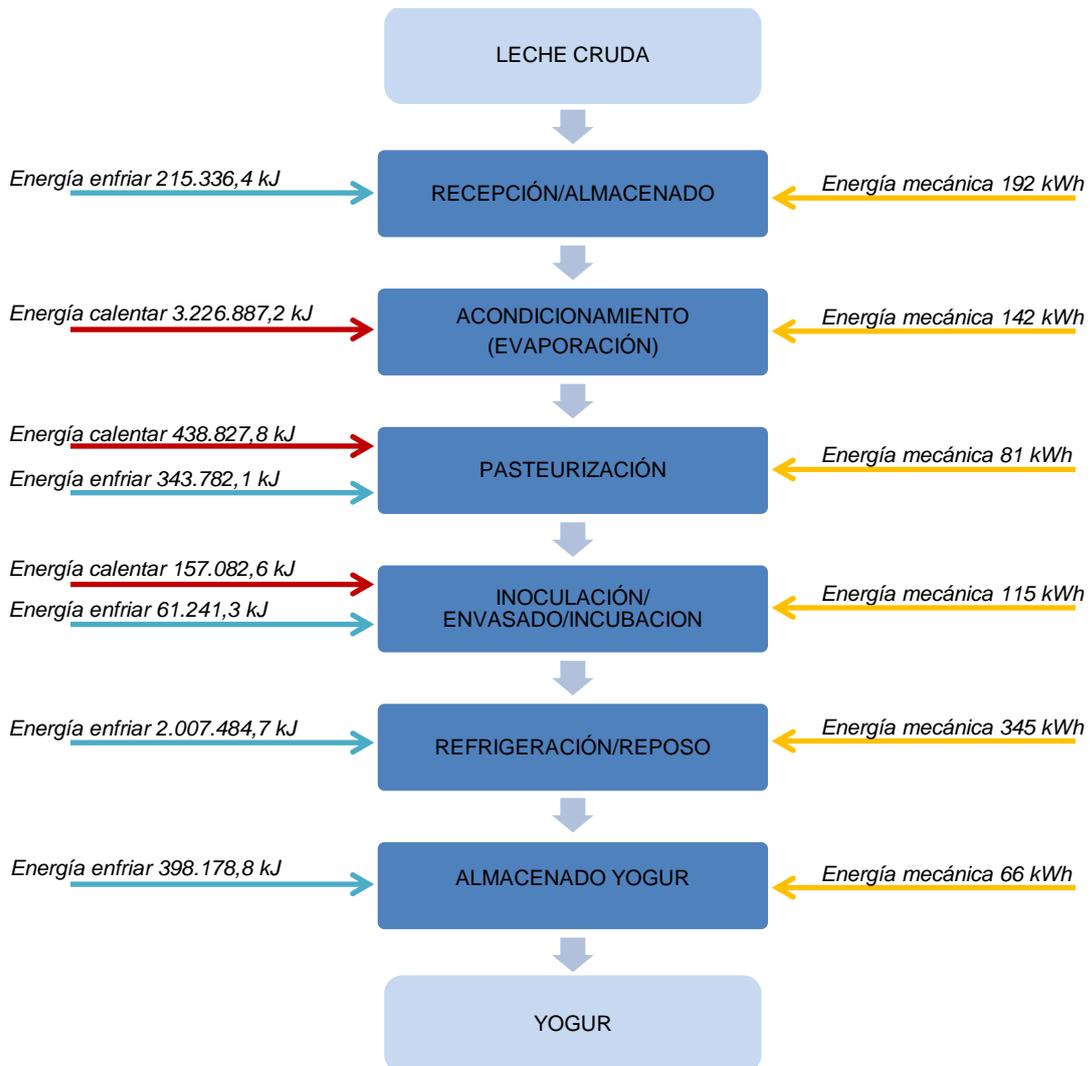


Ilustración 4.11 Diagrama de flujo de la energía aportada al sistema si la normalización es por evaporación

Tabla 4.36 Balance de energía si la normalización es por ultrafiltración

Proceso	Energía para calentar (kJ)	Energía para enfriar (kJ)	Pérdidas (kJ) E ó T	Energía mecánica (kWh)
Recepción-Almacenado		254.558,80	12.727,9 E	170,5
Refrigeración			13.364,3 E	43,6
Total Almacenado leche		280.651,04		214,1
Carga del yogur en Recepción-Almacenado leche		268.049,81		204,5
Normalización grasa	3.290.555,6		164.527,8 T	
Regeneración 2ª	-1.425.203,0			
Carga del yogur	1.781.598,3		157.140,5 T	
Calentamiento nata	23.729,7		1.186,5 T	
Normalización ESM			37.187,8 T	
Homogeneización	551.161,8			
Suma adecuación leche	2.356.489,8		195.514,8 T	202,9
Calefacción			127.600,2 T	10
Total adecuación leche	2.679.604,8			212,9
Pasteurización	654.823,0	1.925.950	32.741,2 T	
Regeneración 1ª	-269.633,0		96.297,5 E	
Total regeneración		-1.694.836		
Suma Pasteurización	385.190,0	231.114	32.741,2 T 96.297,5 E	42,0
Calefacción			20.896,6 T	3,0
E. Refrigeración			16.370,6 E	35,9
Total Pasteurización	438.827,8	343.782,1		80,9
Inoculación	107.340,8	55.547,6	5.367,0 T 2.777,4 E	
Envasado-Incubación	35.137,8		1.756,9 T	
Suma Inoculación-Envasado-Incubación	142.478,6	55.547,6	7.123,9 T 2.777,4 E	108,0
Calefacción			7.480,1 T	1,0
E. Refrigeración			2.916,3 E	6,4
Total Inoculación-Envasado-Incubación	157.082,6	61.241,3		115,4
Refrigeración yogur		1.580.074,5	79.003,8 E	276 11
Reposo			252.811,9 E	42,1
E. Refrigeración			82.953,9 E 12.640,6 E	15,9
Total Refrigeración-Reposo		2.007.484,7		344,9
E. Refrigeración			379.217,9 E 18.960,9 E	66,2
Total Almacenado yogur			398.178,8	66,2
Limpieza	1.365.405,4			65
Calefacción			68.270,3 T	14
Total Limpieza	1.433.675,7			79
Total Proceso	4.709.190,5	3.091.337,9		1103 kWh

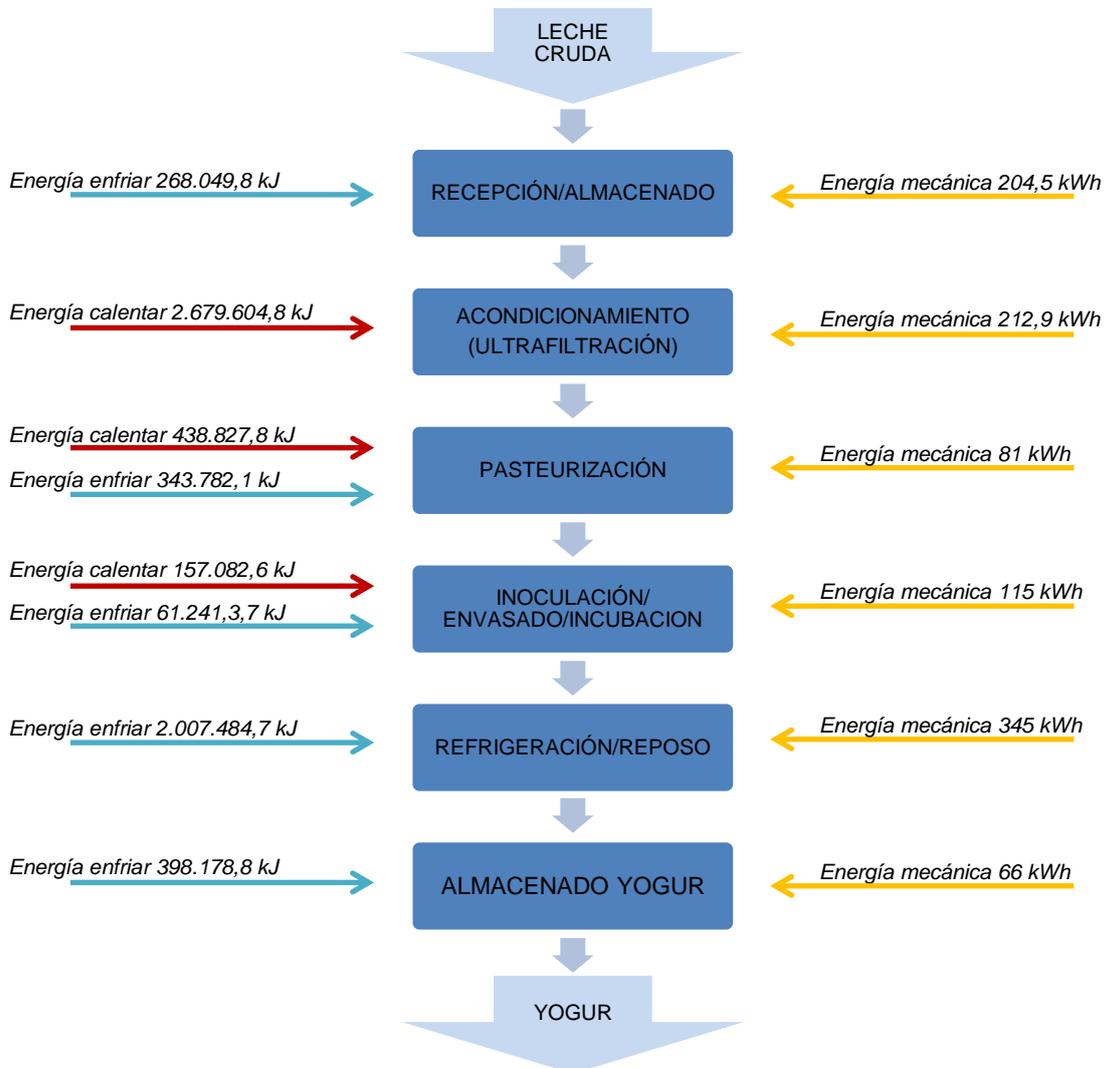


Ilustración 4.12 Diagrama de flujo de la energía aportada al sistema si la normalización es por ultrafiltración

4.3.17 Balance de energía

La energía térmica necesaria se obtiene del cociente de la energía para calentar obtenida en las anteriores tablas y el rendimiento de la caldera (0,88). La energía eléctrica consumida corresponde a la energía mecánica. Finalmente, el consumo de energía térmica (MJ) y eléctrica (kWh) para cada sistema se resume en la *Tabla 4.37*, *Tabla 4.38* y *Tabla 4.39*.

Tabla 4.37 Balance energético final del sistema si la normalización es por adición de leche en polvo

Sistema	Energía útil térmica (kJ)	Energía térmica (MJ)	Energía eléctrica (kWh)
Recepción - Almacenado leche			181
Adecuación leche	1.309.446	1.488	124
Pasteurización	438.828	499	81
Inoculación – Envasado - Incubación	157.083	179	115
Refrigeración - Reposo			345
Almacenado yogur			66
Limpieza	1.433.675	1.629	79
Total Sistema	3.339.039	3.794	990

Tabla 4.38 Balance energético final del sistema si la normalización es por evaporación

Sistema	Energía útil térmica (kJ)	Energía térmica (MJ)	Energía eléctrica total (kWh)
Recepción - Almacenado leche			192
Adecuación leche	3.226.887	3.667	142
Pasteurización	438.828	499	81
Inoculación – Envasado - Incubación	157.083	179	115
Refrigeración - Reposo			345
Almacenado yogur			66
Limpieza	1.433.675	1.629	79
Total Sistema	5.256.473	5.973	1.020

Tabla 4.39 Balance energético final del sistema si la normalización es por ultrafiltración

Sistema	Energía útil térmica (kJ)	Energía térmica (MJ)	Energía eléctrica total (kWh)
Recepción - Almacenado leche			204
Adecuación leche	2.679.604	3.045	213
Pasteurización	438.827	499	81
Inoculación – Envasado - Incubación	157.082	179	115
Refrigeración - Reposo			345
Almacenado yogur			66
Limpieza	1.433.675	1.629	79
Total Sistema	5.709.191	5.351	1.103

5 Evaluación de impactos

A partir de los resultados obtenidos en el inventario se evalúa la importancia de los impactos medioambientales potenciales del sistema, cuantificando la contribución de cada contaminante a cada categoría de impacto para finalmente obtener una valoración.

El método para la evaluación de impactos es, primero clasificar los datos del inventario en categorías de impacto medioambiental. A continuación, utilizando factores de equivalencia o de caracterización para cada categoría mediante una base de datos, se cuantifica cada contribución potencial individual. Finalmente se suma cada contribución individual para calcular la contribución potencial del producto

La categoría de impacto considerada es el calentamiento global. La unidad de medida del calentamiento global son kg de CO₂. Esta categoría se ha evaluado mediante el método CML 2001 (actualizado a 2009) desarrollado por la Universidad de Leiden y aceptado internacionalmente.

Para calcular el calentamiento global producido por la obtención de energía, los datos utilizados pertenecen a la base de datos del software GaBi4 y corresponden a las entradas y salidas de materia para la obtención de 1 kWh de electricidad en España y de 1 MJ de energía térmica a partir de gas natural. Los factores de caracterización utilizados son los desarrollados por el CML holandés.

Así, se han realizado las operaciones necesarias para determinar cuantos kg de CO₂ se emiten por cada kWh de electricidad generada en España y también los kg de CO₂ que se emiten para obtener 1MJ de energía térmica a partir de gas natural. Las operaciones que deben realizarse son multiplicar primero el flujo de entradas y de salidas de cada contami-

nante emitido para la obtención de energía por su factor de caracterización; hacer el sumatorio de entradas y salidas y hallar la diferencia entre salidas y entradas tal como muestran la *Tabla 5.1* y la *Tabla 5.2*. De este modo, se obtiene que los kg de CO₂ equivalente emitidos para la obtención de 1 kWh de electricidad son 0,64 y para 1MJ de energía térmica obtenida a partir de gas natural, 0,063 kg de CO₂ eq (ver *Tabla 5.1.* y *Tabla 5.2*).

Estas emisiones de CO₂ eq son las que se utilizarán para determinar el calentamiento global potencial producido por cada una de las etapas del proceso de fabricación del yogur debido a sus distintos consumos energéticos.

Por otro lado, se han calculado también a partir de la misma base de datos del software GaBi4 y por el mismo procedimiento, las emisiones de CO₂ eq. debidas a la fabricación de los distintos materiales de envase y embalaje y de los productos químicos utilizados en la limpieza de las instalaciones, obteniéndose los valores que se presentan en la

Tabla 5.1 Flujo de salida menos entrada por 1 kWh de electricidad y su equivalencia en kg de CO₂

	Flujo (kg)	Factor Caracterización (kg CO ₂)	Flujo de CO ₂ equivalente (kg)
ENTRADAS			
<i>Carbon dioxide [Renewable resources]</i>	3,01 E-02	1	0,0301
Total Flujo Entrada (kg CO ₂ /kWh e)			0,030
SALIDAS			
<i>Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]</i>	0,6340	1	0,6340
<i>Carbon dioxide (biotic) [Inorganic emissions to air]</i>	3,46 E-04	1	3,46 E-04
<i>Dichloromethane (methylene chloride) [Halogenated organic emissions to air]</i>	4,86 E-17	10	4,86 E-16
<i>Methane [Organic emissions to air (group VOC)]</i>	1,27 E-03	23	2,92 E-02
<i>Nitrous oxide (laughing gas) [Inorganic emissions to air]</i>	1,13 E-05	296	3,34 E-03
<i>R 11 (trichlorofluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	5,44 E-08	4600	2,50 E-04
<i>R 114 (dichlorotetrafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	5,57 E-08	9800	5,46 E-04
<i>R 12 (dichlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	1,17 E-08	10600	1,24 E-04
<i>R 13 (chlorotrifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	7,34 E-09	14000	1,02 E-04
<i>R 22 (chlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	1,27 E-08	1700	2,17 E-05
<i>Sulphur hexafluoride [Inorganic emissions to air]</i>	1,72 E-11	22200	3,82 E-07
<i>Tetrafluoromethane [Halogenated organic emissions to air]</i>	3,81 E-10	5700	2,17 E-06
<i>VOC (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)]</i>	3,92 E-08	16,1	6,31 E-07
Total Flujo Salida (kg CO ₂ /kWh e)			0,668
TOTAL ENTRADAS/SALIDAS(kg CO₂/kWh e)			0.638

Tabla 5.2 Flujo de salida menos entrada por 1 MJ de energía térmica a partir de gas natural y su equivalencia en kg de CO₂

	Flujo (kg)	Factor Caracterización (kg CO ₂)	Flujo de CO ₂ equivalente (kg)
ENTRADAS			
<i>Carbon dioxide [Renewable resources]</i>	1,42 E-05	1	1,42 E-05
Total Flujo Entrada (kg CO ₂ /MJ t)			1,42 E-05
SALIDAS			
<i>Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]</i>	5,92E-02	1	5,92 E-02
<i>Carbon dioxide (biotic) [Inorganic emissions to air]</i>	1,32E-05	1	1,31 E-05
<i>Dichloromethane (methylene chloride) [Halogenated organic emissions to air]</i>	5,05E-20	10	5,04 E-19
<i>Methane [Organic emissions to air (group VOC)]</i>	1,57E-04	23	3,62 E-03
<i>Nitrous oxide (laughing gas) [Inorganic emissions to air]</i>	8,74E-07	296	2,59 E-04
<i>R 11 (trichlorofluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	4,28E-11	4600	1,97 E-07
<i>R 114 (dichlorotetrafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	4,38E-11	9800	4,29 E-07
<i>R 12 (dichlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	9,20E-12	10600	9,75 E-08
<i>R 13 (chlorotrifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	5,78E-12	14000	8,09 E-08
<i>R 22 (chlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]</i>	1,01E-11	1700	1,71 E-08
<i>Sulphur hexafluoride [Inorganic emissions to air]</i>	1,11E-14	22200	2,46 E-10
<i>Tetrafluoromethane [Halogenated organic emissions to air]</i>	8,87E-13	5700	5,05 E-09
<i>VOC (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)]</i>	1,87E-08	16,1	3,00 E-07
Total Flujo Salida (kg CO ₂ /MJ t)			0,063
TOTAL ENTRADAS/SALIDAS (kg CO₂/MJ t)			0.063

Tabla 5.3 Emisiones (kg CO₂ eq.) de los materiales de envase y embalaje y de los detergentes

MATERIAL	MATERIAL	PESO (kg)	Entradas/salidas kg CO ₂ eq/kg	Total kg CO ₂ eq potencial
Termoformado (a)				1.690,14 kg
Tarrina	PS ^a	370,8	4,401	1631,89 kg
Banderola	Papel ^b	49,44	0,822	40,64 kg
Tapa	Papel ^b	21,42	0,822	17,61 kg
Vidrio (b)				6.201,58 kg
Tarrina	Vidrio ^c	7.333,6	0,768	5632,20 kg
Tapa	Aluminio ^d	41,2	11,642	479,65 kg
Faja	Cartón ^e	226,6	0,396	89,73 kg
Caja de agrupado	Cartón ^e	515,1	0,396	203,98 kg
Palé	Madera	752	No hay datos	
Film retráctil	Polietileno ^f	9,6	2,408	23,12 kg
Sosa	NaOH 100% ^g	63	1,628	102,56 kg
Ácido	HNO ₃ 60% ^h	21	1,438	30,20 kg

^a Polystyrene (Plastic Europe); ^b Paper woody coated (BUWAL); ^c Glass_white packaging (BUWAL); ^d Al sheet_0,7 mm (BUWAL); ^e Corrugated cardboard (BUWAL); ^f Polyethylene film (PE-LD) PlasticsEurope; ^g DE: Sodium hydroxide (from chlorine-alkali electrolysis, diaphragm) PE; ^h DE: Nitric acid (60%) PE

5.1 Resultados de la evaluación de impactos

Para poder introducir mejoras, es necesario evaluar las etapas del proceso cuyo impacto es mayor y comparar entre sí las diferentes posibilidades dentro de cada etapa.

Para ello, a partir de los datos obtenidos, por procesos y materiales, se procede a evaluar el impacto de cada etapa dentro del proceso global. También se comparan los diferentes métodos de normalización del ESM, de pasteurización, de incubación y finalmente los diferentes envases.

Para la obtención de los datos, el estudio se ha basado en una serie de hipótesis a partir de datos bibliográficos y que son susceptibles de variar en un estudio particular: Estas son:

-
- La composición de la leche depende de la raza de la vaca, del lugar y de la época del año en que es recogida. Se ha tomado como base un promedio bibliográfico, aunque existen estadísticas mensuales proporcionadas por Federación Nacional de Industrias Lácteas y por los Laboratorios Interprofesionales Lecheros de cada comunidad.
 - La composición final del yogur natural se ha estimado a partir de los productos existentes en el mercado.
 - Se ha estimado una temperatura media ambiente, como base para los cálculos energéticos de 12°C para el exterior y 16°C para el interior.
 - Los tiempos del almacenado de la leche (1 día) y del yogur (5 días desde la incubación) son estimados.
 - La temperatura de las diferentes operaciones está en el punto medio del rango de temperaturas de trabajo de éstas.
 - Al no disponer de datos reales, el valor del calor específico del yogur considerado es el de la leche entera, ya que tienen una composición semejante.
 - No se han tenido en cuenta las pérdidas de material existentes por adhesión de la leche o yogur a las superficies de contacto (tuberías, maquinaria, depósitos,...).
 - La unidad funcional, 10.300 kg de yogur diarios, es una estimación aunque es próxima a un caso de producción real de una empresa mediana.
 - La maquinaria está dimensionada para la producción diaria a partir de datos proporcionados por una empresa real que no se cita por motivos de confidencialidad.
 - Las pérdidas energéticas son estimaciones (5% en las operaciones y 8% diario en los almacenados), al no disponer de datos reales de una instalación.
 - Los envases han sido seleccionados basándose en los envases más comunes existentes en el mercado.

5.1.1 Peso de las distintas etapas en el impacto global del proceso

En la *Tabla 5.4* y la *Ilustración 5.1* se resume el flujo potencial de CO₂ para cada subsistema a partir del balance energético. En la etapa de envasado se han sumado además las emisiones que afectan al calentamiento global (en kg de CO₂ eq) debidas a la fabricación de los materiales del envase y de embalaje, según la

Tabla 5.3. El envase considerado es el termoformado. En la etapa de limpieza se han sumado también las emisiones debidas a la fabricación de los detergentes, en este caso, el hidróxido sódico y el ácido nítrico. No se tienen en cuenta otros productos detergentes, que deberían estudiarse para cada caso en particular.

Como puede apreciarse en la *Ilustración 5.1*, el subsistema inoculación-ensado-incubación es quien soporta el mayor peso respecto al calentamiento global, por lo que no se aprecian grandes diferencias entre los diferentes sistemas de normalización. Dentro de este subsistema, la participación más importante respecto al calentamiento global corresponde a los envases, como muestra la *Ilustración 5.3*.

Los siguientes procesos con mayor peso respecto al calentamiento global son el acondicionamiento de la leche, la limpieza y la refrigeración, como se ve en la *Ilustración 5.2*.

Tabla 5.4 Potencial de calentamiento global de las distintas etapas del proceso

Sistema	kWh	kg CO ₂ e	MJ	kg CO ₂ t	kg CO ₂ envases/ detergentes	Total kg CO ₂ eq.
Adición de leche en polvo						
Recepción-Almacenado leche	181	115	0	0		115
Adecuación de la leche	124	79	1.488	94		173
Pasteurización	81	52	499	31		83
Inoculación-Envasado- Incubación	115	74	179	11	1.936	2.020
Refrigeración-Reposo	345	220	0	0		220
Almacenado yogur	66	42	0	0		42
Limpieza	79	50	1.629	103	133	286
Evaporación						
Recepción-Almacenado leche	192	123				123
Adecuación de la leche	142	90	3.667	231		322
Pasteurización	81	52	499	31		83
Inoculación-Envasado- Incubación	115	74	179	11	1.936	2.020
Refrigeración-Reposo	345	220				220
Almacenado yogur	66	42				42
Limpieza	79	50	1.629	103	133	286
Ultrafiltración						
Recepción-Almacenado leche	204	130				130
Adecuación de la leche	213	136	3.045	192		328
Pasteurización	81	52	499	31		83
Inoculación-Envasado- Incubación	115	74	179	11	1.936	2.020
Refrigeración-Reposo	345	220				220
Almacenado yogur	66	42				42
Limpieza	79	50	1.629	103	133	286

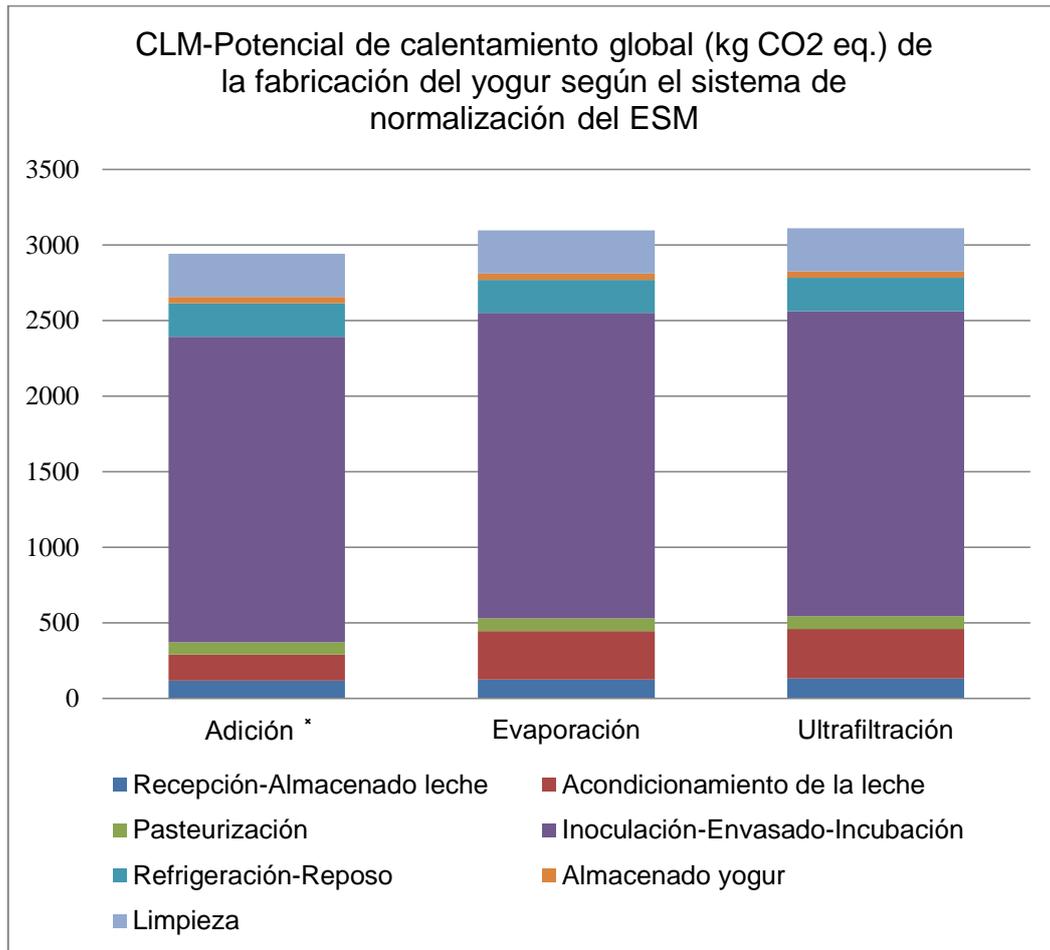


Ilustración 5.1 Potencial de calentamiento global de la fabricación del yogur tradicional según el método de normalización del ESM

* No están incluidas en el acondicionamiento de la leche las emisiones debidas a la fabricación de la leche en polvo

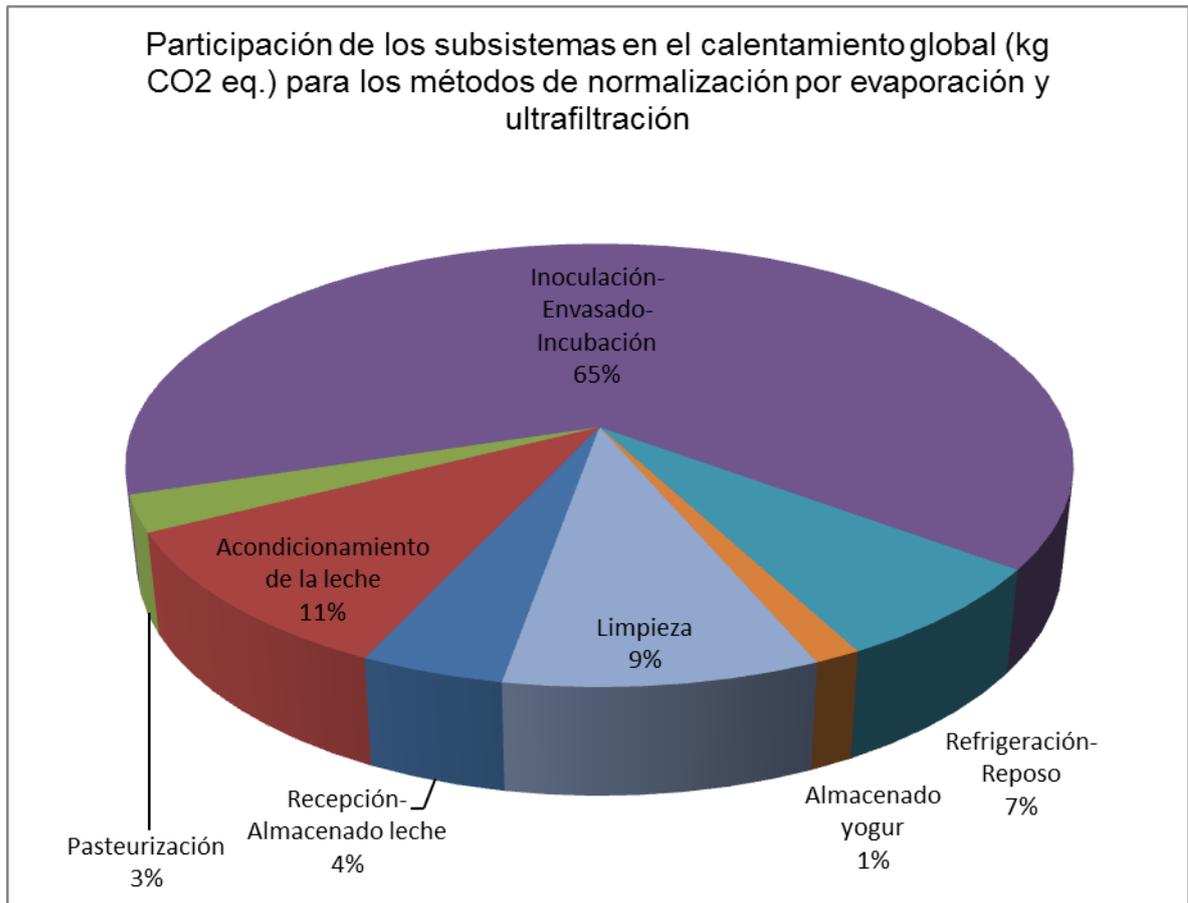


Ilustración 5.2 Participación de los procesos en el potencial de calentamiento global

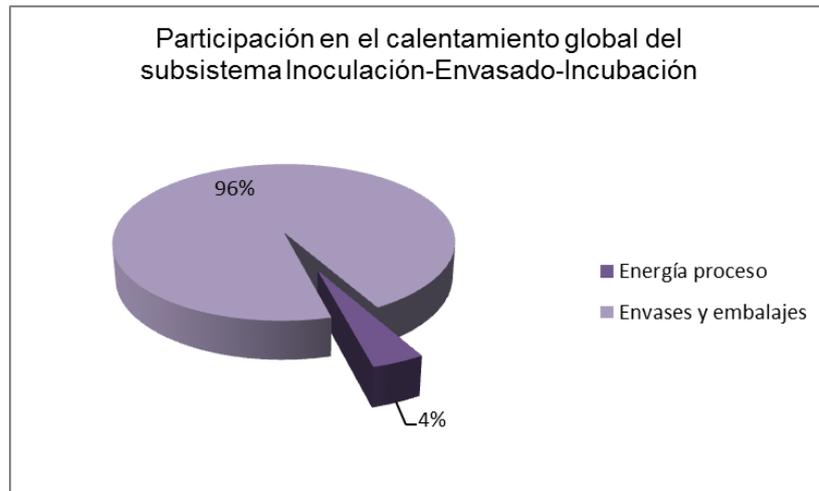


Ilustración 5.3 Peso de las entradas al subsistema Inoculación-Envasado-Incubación en el calentamiento global

Dado el gasto energético de la refrigeración y la limpieza, sería deseable el aprovechar el calor extraído para enfriar el yogur y la leche en precalentar el agua de entrada a la caldera o a la limpieza.

Si consideramos las entradas al sistema: energía eléctrica, energía térmica, envases y detergentes, sin tener en cuenta la leche, como vemos en la *Ilustración 5.4*, los envases son quienes tienen un mayor peso en el calentamiento global.

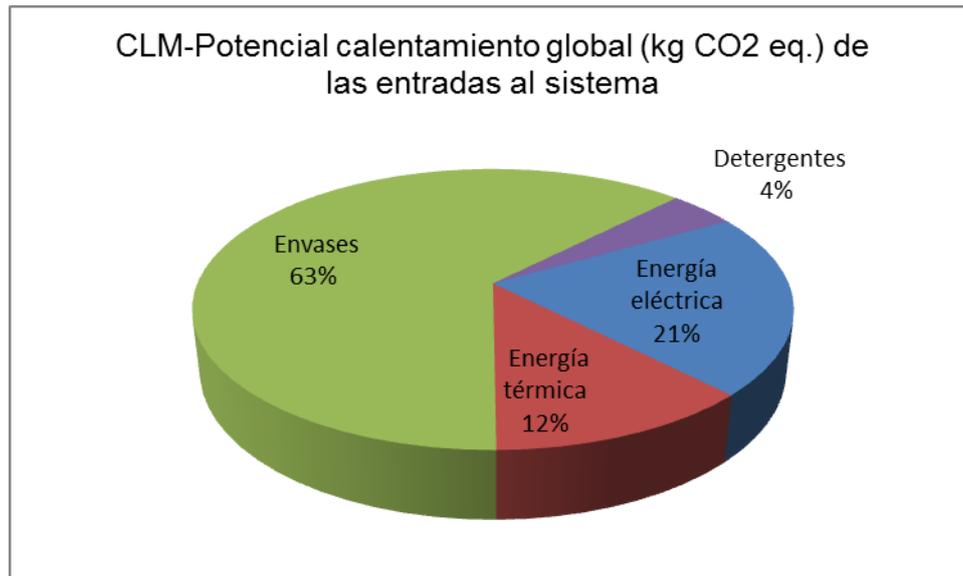


Ilustración 5.4 Influencia de las entradas al sistema en el calentamiento global

5.1.2 Comparación de los diferentes sistemas de normalización del ESM

Hay que tener en cuenta que en la normalización por adición se han omitido los datos del potencial calentamiento de la fabricación de la leche en polvo desnatada por falta de datos, por lo que los resultados obtenidos no pueden ser comparables con los otros dos sistemas de normalización. Por este motivo, a la hora de comparar estos sistemas, el de adición no será representado en el gráfico.

Para la obtención de leche en polvo desnatada la leche cruda es desnatada, pasteurizada, concentrada en ESM mediante evaporación y finalmente deshidratada. Es lógico suponer que la cantidad de energía necesaria para evaporar y deshidratar la leche hasta un contenido en agua del 3% es mayor que la energía consumida en la evaporación durante la normalización del yogur.

Para poder comparar los métodos de normalización del ESM, basta con comparar los subsistemas que son diferentes entre ellos, la recepción, el almacenado y la adecuación de la leche, tal como se ve en la *Ilustración 5.5*, donde se observa que la diferencia entre ambos métodos no es significativa frente al calentamiento global.

En el caso de la evaporación, debería replantearse el sistema de regeneración con el fin de reducir la energía necesaria para el calentamiento de la leche previo a la evaporación y el aprovechamiento del calor y del agua que queda como residual en el agua evaporada (2.677 kg de agua a 70°C), por ejemplo, como agua caliente en las operaciones de limpieza.

En el caso de la ultrafiltración se obtiene una gran cantidad de residuo, el filtrado (5.779 kg), que puede ser aprovechado para alimentación animal. La cantidad de leche requerida es mucho mayor, 16.854 kg, frente a 13.408 kg para evaporación.

La calidad del yogur obtenido por ambos métodos es parecida y superior a la obtenida por adición de leche en polvo [6].

De todo esto se puede considerar que la normalización por evaporación es más ventajosa con respecto al calentamiento global, ya que hay oportunidades de reducir el consumo de energía, no se obtienen subproductos y el consumo de leche es mucho menor que en la ultrafiltración.

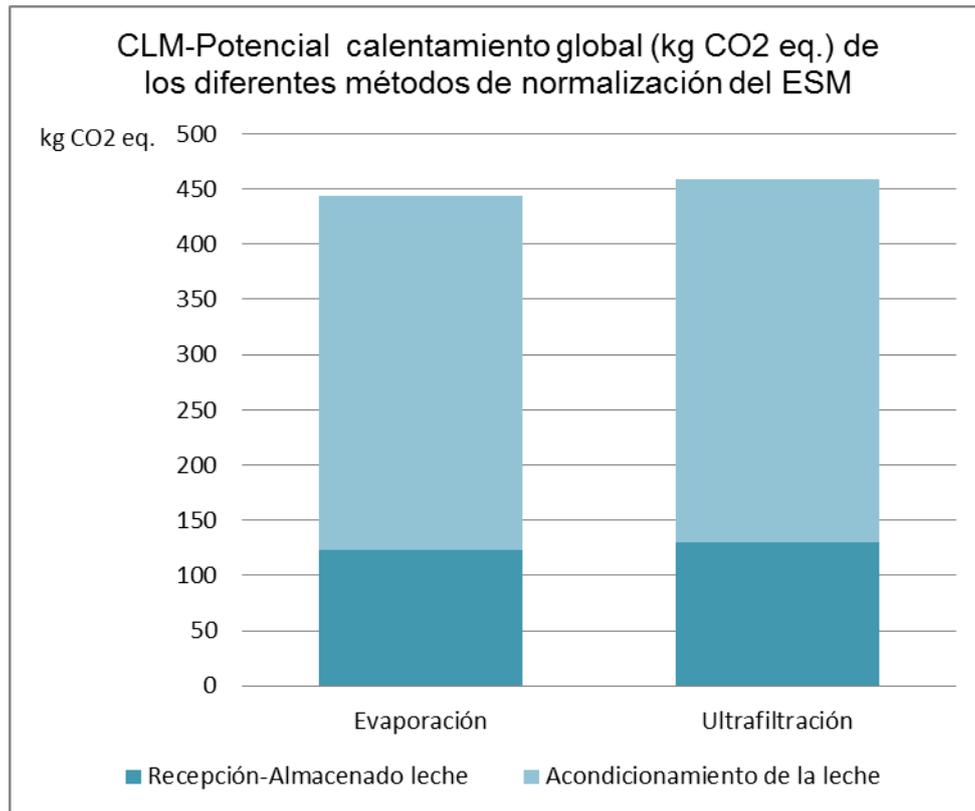


Ilustración 5.5 Potencial de calentamiento global según el método de normalización del ESM

5.1.3 Comparación de los diferentes sistemas de pasteurización

De la misma manera que la normalización, se comparan los diferentes programas de pasteurización. La *Tabla 5.5* muestra la energía requerida, sin tener en cuenta las pérdidas ni la energía mecánica, en cada método de pasteurización; el consumo de energía térmica y eléctrica y el potencial calentamiento global asociado a cada una, que aparece comparado gráficamente en la *Ilustración 5.6*.

Tabla 5.5 Emisiones potenciales de CO₂ de los diferentes métodos de pasteurización

Temperatura de pasteurización	85°C	92°C	120°C
E. útil calentamiento (kJ)	577.785	577.785	1.078.532
E. Térmica (MJ)	657	657	1.226
kg CO ₂ T	41	41	77
E. útil enfriamiento (kJ)	231.114	231.114	423.709
E. Eléctrica (kWh)	24	24	44
kg CO ₂ E	15	15	28
Total kg CO ₂	57	57	105

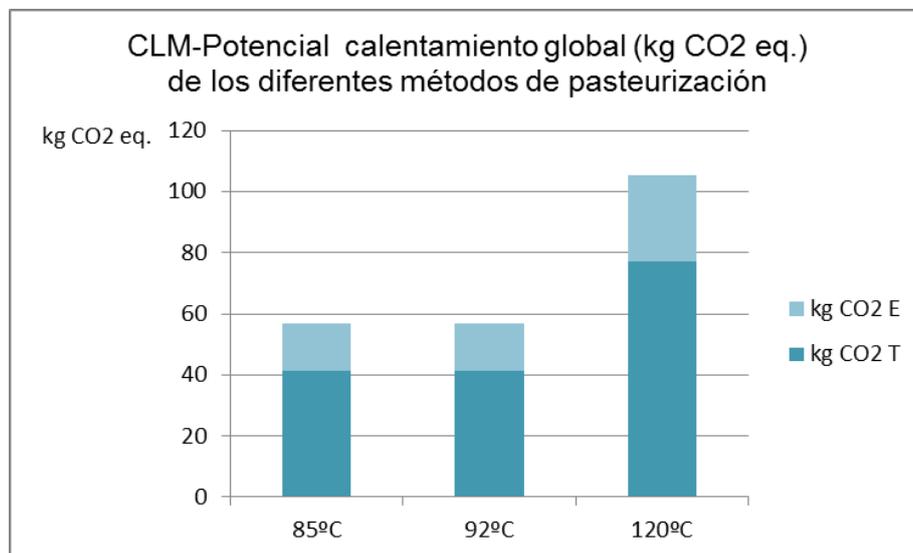


Ilustración 5.6 Potencial de calentamiento global según el método de pasteurización

Como puede observarse, los impactos de las pasteurizaciones a 85°C y 92°C son iguales ya que en la pasteurización a 92°C se aprovecha la diferencia de energía consumida para calentar y enfriar la leche por regeneración. En la pasteurización a 120° el impacto es casi el doble que en los anteriores, debido a que una gran parte de la energía necesaria para el proceso a 120°C no puede recuperarse por regeneración por el régimen de temperaturas de trabajo en la producción de yogur.

Al no disponer de datos reales de una instalación, las pérdidas de energía térmica producida en cada una de las pasteurizaciones sólo se pueden evaluar comparativamente, según datos de la *Tabla 4.17*, y serán proporcionales a la superficie (*S*) y al coeficiente global de transmisión térmica (*K*) del intercambiador de calor, como muestra la *Ilustración 5.7*.

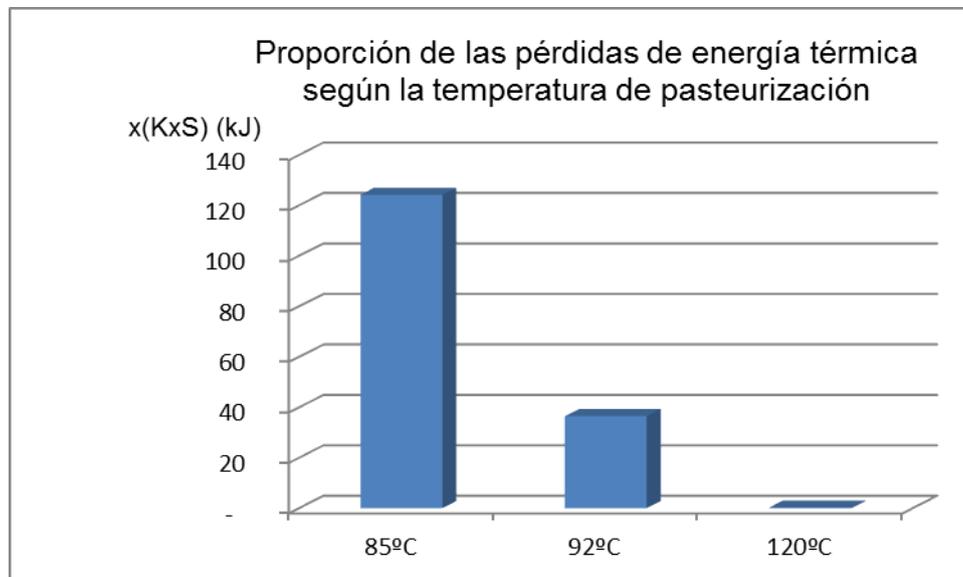


Ilustración 5.7 Pérdidas de energía térmica, proporcionales a *K* y a *S*, según la temperatura de pasteurización

Teniendo en cuenta que las pérdidas de calor por transmisión son mayores en la pasteurización a 85°C, por necesitar un mayor tiempo de permanencia a esta temperatura, la pasteurización de menor impacto en el calentamiento global es la realizada a 92°C.

5.1.4 Comparación de los sistemas de incubación

En la comparación de los dos métodos de incubación no se tienen en cuenta las pérdidas de calor durante el proceso, ya que deberían estudiarse para una instalación en particular. Los resultados obtenidos están reflejados en la *Tabla 5.6* y la *Ilustración 5.8*.

Sin tener en cuenta las pérdidas de calor, la incubación a 30°C es la que tiene un menor impacto sobre el calentamiento global, aunque por el mayor tiempo de proceso, las pérdidas son mucho mayores, por lo que finalmente, y dependiendo del tipo de instalación, la diferencia entre ambas podría ser mucho menor.

Tabla 5.6 Energía y potencial calentamiento global de los métodos de incubación

Temperatura de incubación	30°C		42°C	
	Calentam.	Refriger.	Calentam.	Refriger.
E. útil (kJ)	73.913	1.594.999	126.125	1.647.130
E. absorbida	84,0 MJ	236,1 kWh	143,3 MJ	274,0 kWh
kg CO ₂	5	151	9	175
Total kg CO ₂	156		184	

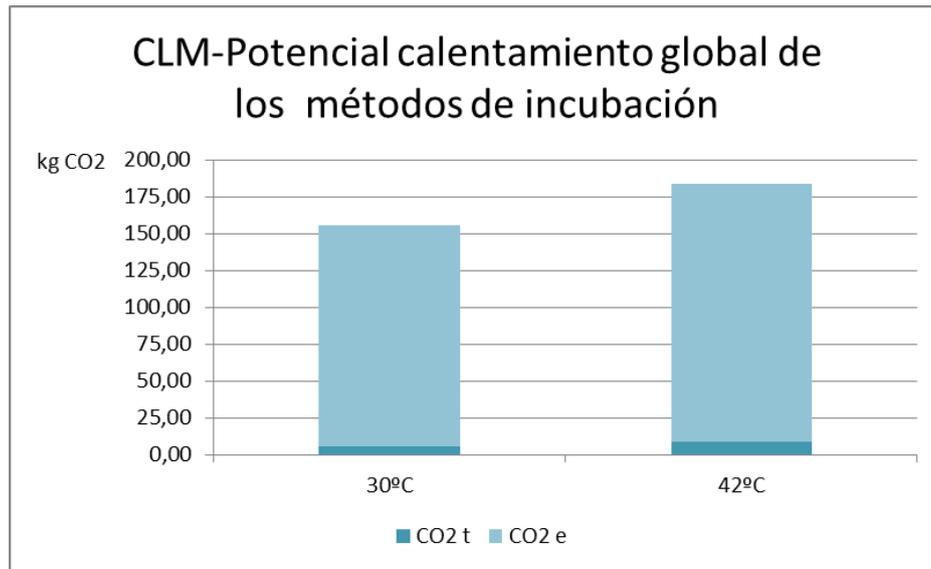


Ilustración 5.8 Potencial calentamiento global según el método de incubación (pérdidas de energía o consideradas)

5.1.5 Comparación de los envases

En la comparación entre los envases termoformados y los de vidrio se tiene en cuenta el impacto procedente del material de envase y el de la energía consumida en calentarlos y enfriarlos, cuyos datos se muestran en la *Tabla 5.7* e *Ilustración 5.9*. No se han tenido en cuenta las pérdidas de energía.

Tabla 5.7 Potencial calentamiento global de los envases y embalajes del yogur

Envase	kg CO ₂ eq E	kg CO ₂ eq t	kg CO ₂ eq envases	Total kg CO ₂ eq
Termoformado	2,13	1,01	1.690	1.693
Vidrio	26,88	12,74	6.202	6.241
Caja de agrupado	3,18	1,51	204	209
Palé	7,12	3,37		10
Film retráctil	0,02	0	23	23
Total embalaje	10,32	4,88	227	242

Como puede observarse en la *Ilustración 5.9*, el envase termoformado es el que tiene un menor impacto sobre el calentamiento global. Así mismo, el impacto del embalaje (sin incluir la fabricación del palé por carecer de datos) es mucho más pequeño que el del envase primario.

La *Ilustración 5.10* muestra la proporción del impacto sobre el calentamiento global entre el envase termoformado, el más habitual, y el embalaje.

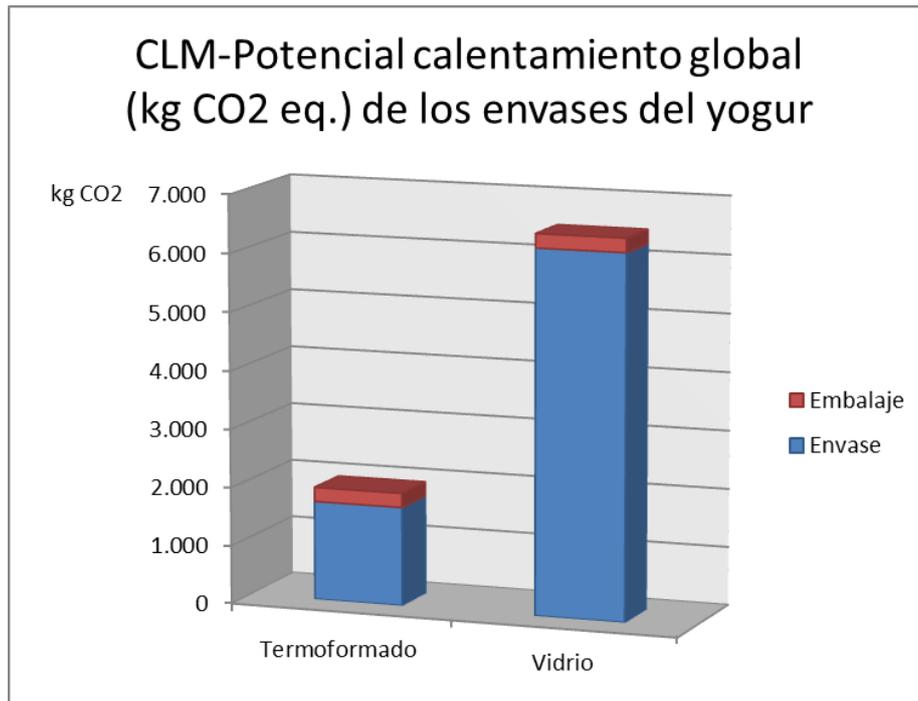


Ilustración 5.9 Comparación del potencial calentamiento global de los envases del yogur

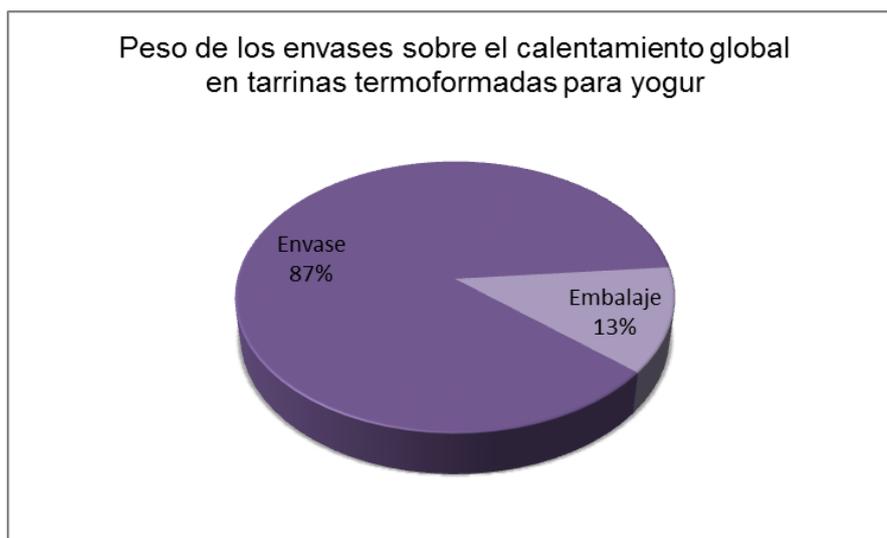


Ilustración 5.10 Peso del impacto sobre el calentamiento global de los envases del yogur

6 Conclusiones

Al inicio de este proyecto, desconocía totalmente cómo es una industria láctea y el procedimiento para elaborar un análisis del ciclo de vida, su realización ha servido como introducción a ambos.

En la elaboración de este estudio se ha obtenido un inventario completo del proceso de fabricación del yogur, a partir de varias fuentes de datos y después de realizar los correspondientes balances materiales y energéticos del proceso.

La fuente para la recogida de datos para la elaboración del inventario ha sido fundamentalmente bibliográfica, aunque también se han realizado visitas a dos empresas de fabricación de yogures, El Pastoret de la Segarra y La Fageda, a partir de las cuales se han comprobado algunos datos y obtenido otros que no se encontraban en la bibliografía.

Se ha realizado además una evaluación de la huella de carbono del proceso de elaboración del yogur, estudiando y comparando diferentes opciones de proceso.

Para realizar dicha evaluación ambiental se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- La unidad funcional son 10.300 kg de yogur natural tradicional de composición 3,5% MG y 11,6% ESM, producidos diariamente.
- La materia prima es leche de vaca de composición media: 3,98% MG y 9% ESM.
- Las temperaturas media ambientales son de 12°C para el exterior de la planta y 16°C para el interior.

-
- El tiempo de almacenado de la leche cruda es de un día hasta su procesado y el del yogur de 5 días hasta su distribución.
 - Unas pérdidas energéticas del 5% en cada operación realizada durante el proceso de fabricación y del 8% diario en los almacenados.

La evaluación de la huella de carbono del proceso de fabricación de yogur ha conducido a las siguientes conclusiones:

- a) Los envases del yogur son los que constituyen una mayor carga con respecto al calentamiento global.
- b) Son importantes los sistemas de recuperación de energía y los aislamientos para reducir la carga térmica del sistema.
- c) La refrigeración del yogur y las operaciones de limpieza suponen también un impacto importante en el calentamiento global. En estas operaciones es muy importante el aprovechamiento energético y la reducción en el uso de detergentes.
- d) La normalización del ESM por evaporación acompañada de un sistema de recuperación energética supone menos carga que la normalización por ultrafiltración en el calentamiento global y consume menos recursos (leche).
- e) La pasteurización a 90-95°C, la más habitual, es la de menor potencial de calentamiento global.
- f) No se puede llegar a concluir el mejor método de incubación, ya que depende de las pérdidas de calor durante el proceso y que no han sido cuantificadas.
- g) El envase termoformado es, con diferencia respecto al de vidrio, el de menor potencial de calentamiento global.

El caso de la normalización por adición de leche en polvo no ha podido compararse a las otras alternativas por falta de datos de la fabricación de leche en polvo, que pueden ser estudiados en el futuro.

7 Bibliografía

- [1] P. FULLANA y S. Y. O. SAMITIER, *Iniciació a l'Avaluació del Cicle de Vida*, Randa Group, S.A., 1996.
- [2] P. FULLANA y R. PUIG, *Análisis del ciclo de vida*, Rubes Editorial, S.L., 1997.
- [3] R. ROMERO DEL CASTILLO SHELLY y J. MESTRES LAGARRIGA, *Productos lácteos. Tecnología.*, Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2004.
- [4] FENIL, Federación Nacional de Industrias Lácteas, «FENIL,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.fenil.org/Sector.asp>. [Último acceso: abril 2012].
- [5] IDEPA, INSTITUTO DE DESARROLLO ECONOMICO DEL PRINCIPADO DE ASTURIAS, «www.idepa.es,» enero 2011. [En línea]. Available: http://idepa.es/sites/web/idepaweb/productos/flashsectorial/Sector_Lacteo/index.jsp. [Último acceso: abril 2012].
- [6] A. Y. TAMIME y R. K. ROBINSON, *Yogur. Ciencia y tecnología.*, Zaragoza: Editorial Acribia, S.A., 1991.
- [7] M. S. GÖSTA BYLUND, *Manual de industrias lácteas*, Lund: A. Madrid Vicente, Ediciones, 2003.

-
- [8] R. D. 179/2003, *Norma de calidad para el yogur*, Madrid, 2003.
- [9] R. TOJO SIERRA, R. LEIS TRABAZO, J. BARROS VELÁZQUEZ y M. PRADO RODRIGUEZ, «*Productos lácteos fermentados*,» *Anales de Pediatría*, vol. 4, nº 1, pp. 54-56, 2006.
- [10] S. TOLOSA, J. BULLÓN y A. CÁRDENAS, «*Producción de yogur utilizando membranas cerámicas para incrementar el porcentaje en sólidos en la leche*,» *Ciencia e Ingeniería*, vol. 27, nº 1, 2006.
- [11] X. PONT, Interviewee, Comunicación personal.. [Entrevista]. 29 mayo 2012.
- [12] GENERALITAT DE CATALUNYA. DEPARTAMENT DE MEDI AMBIENT, *Prevenió de la contaminació en la indústria làctia. Manuals d'ecogestió, 14*, Departament de Medi Ambient, 2003.
- [13] C. ALAIS, *Ciencia de la leche. Principios de técnica lechera.*, Ed. Reverté, 1985.
- [14] IDESCAT, «www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=456&lang=es&t=2007&x=12&y=7,» Departament d'Agricultura, Alimentació i Acció Rural, 2007. [En línea]. [Último acceso: 5 marzo 2012].
- [15] SERVEI METEOROLÒGIC DE CATALUNYA, «meteo.cat,» Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge. [En línea]. [Último acceso: 5 marzo 2012].
- [16] «Miliarium.com Ingeniería Civil y Medio Ambiente,» [En línea]. Available: <http://miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quim/PropiedadesTermicas.asp>. [Último acceso: 11 abril 2012].
- [17] E. TORRELLA ALCARAZ, *La producción de frío*, Valencia: Editorial de la UPV, 1996.
- [18] DELANI TRADING CORP., «DELANI,» [En línea]. Available: http://delanitrading.com/lacteos_00.html. [Último acceso: 2 marzo 2012].

[19] HOVAL ESPAÑA CALOR Y CLIMA, S.L., *Catálogo de productos*, S. Sebastián, 2012.

[20] FERROLI, *Climatización. Catálogo general*, 2010.

[21] COEXPAN-NET, [En línea]. Available: <http://www.coexpan.com/espanol/principal.htm>.
[Último acceso: 29 02 2012].