

Ingeniería de sistemas y eficiencia energética. El caso de un proceso de pasteurización.

J. L. Fernández Sánchez¹ y D. Nicolás Serrano²

1. E.T.S Ingenieros Industriales, José Gutiérrez Abascal 2. 28006 Madrid, josefernandez@ieee.org

2. E.T.S Ingenieros Industriales, José Gutiérrez Abascal 2. 28006 Madrid, dario.nicolas.serrano@alumnos.upm.es

Resumen: En este artículo se propone una metodología sistémica para el cálculo de la eficiencia energética ilustrada con su aplicación en un proceso de pasteurización. La metodología ISE&PPOOA/Energy entiende la instalación como sistema o conjunto de componentes físicos que interactúan para realizar un propósito común. El enfoque propuesto utiliza la notación estándar SysML y conlleva la definición del contexto de aplicación, la identificación de la funcionalidad del sistema y de su arquitectura física, que combinado con las ecuaciones de los balances de materia y energía, permite evaluar la eficiencia de una instalación o parte de ella con el nivel de detalle adecuado, adaptándose este nivel de análisis a los datos del proceso, ecuaciones, gráficos, tablas y otras correlaciones disponibles para la instalación en particular.

En el caso de aplicación se analiza un proceso de pasteurización de leche, donde se han identificado como componentes los principales equipos de la instalación descritos por las ecuaciones necesarias para los balances de materia y energía. Los resultados del análisis de eficiencia energética permiten en este caso diversas soluciones alternativas.

Palabras clave: eficiencia energética, ingeniería de sistemas, modelos SysML, pasteurización.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se considera la eficiencia energética como otro recurso energético mas, capaz de suministrar energía y ahorros en la demanda que disminuiría la generación eléctrica de otras fuentes como carbón, gas, nuclear y renovables.

Según la ACEEE (American Council for an Energy Efficient Economy) los ahorros de energía mediante prácticas de eficiencia energética por parte del consumidor suponen un tercio del costo de otras soluciones como implantar nuevos recursos de generación.

Frecuentemente se han adoptado soluciones de eficiencia energética a nivel de los equipos de una instalación, pero esta aproximación no garantiza que la eficiencia de energética de dicha instalación sea la suma de la eficiencia energética de sus partes, cuándo éstas han sido optimizadas independientemente

En la actualidad se recomienda optimizar la eficiencia energética de una instalación mediante un enfoque sistémico donde se elige para el análisis un conjunto de partes relacionadas, un todo desde el punto de vista sistémico, que puede ser una unidad de proceso, un subsistema o un proceso, EUROPEAN COMMISSION (2009).

Se trata por consiguiente de mejorar la eficiencia energética manteniendo la funcionalidad, las interfaces y las prestaciones de la instalación o sistema considerado en el análisis. El enfoque sistémico nos permite determinar el contorno o frontera de la instalación donde se va a realizar el análisis de la eficiencia energética, pero además se han de elegir los métodos de cálculo o simulación, que usando las leyes de la termodinámica y las ecuaciones de la mecánica de fluidos, permitan determinar numéricamente las pérdidas de energía, reversibilidad, eficiencia y otros parámetros de interés.

El presente artículo se compone de cinco secciones incluyendo esta introducción. En la sección 2 se describe el método propuesto para realizar el análisis de la eficiencia energética de una instalación o parte de ella. El método se basa en la combinación de la ingeniería de sistemas con el uso de las ecuaciones de balance de materia y energía. La sección 3 muestra la aplicación de la metodología al caso del proceso de pasteurización de leche. Se muestran algunos de los modelos de ingeniería de sistemas obtenidos y como se integran con las ecuaciones que rigen el proceso. La sección 4 describe los resultados obtenidos y las recomendaciones prácticas que se podrían dar en función de dichos resultados. Se finaliza con una sección de conclusiones.

2. METODOLOGÍA ISE&PPOOA/ENERGY

En la introducción se ha descrito la importancia de la aplicación de un enfoque sistémico riguroso que identifique los límites del sistema a analizar, sus funciones o procesos y las ecuaciones físicas que rigen su comportamiento, así como la implantación de las funciones en equipos o subsistemas.

La ingeniería de sistemas, tal como se realiza actualmente en el ámbito de los productos complejos, se apoya en el uso de modelos definidos con notaciones estándar soportadas por diversas herramientas informáticas de diseño y modelado. La notación estándar más empleada por la industria de ingeniería de sistemas es la notación SysML (Systems Modeling Language), OMG (2008).

SysML permite crear un modelo coherente de un sistema o producto complejo que, a través de diferentes vistas, represente diversos aspectos de dicho sistema:

- Composición estructural e interconexiones entre los elementos constructivos del sistema.
- Comportamiento y funcionalidad del sistema.
- Restricciones en las propiedades físicas y de rendimiento.
- Asignación y trazabilidad entre los elementos soportados en las diferentes vistas del modelo.
- Modelado de requisitos, elementos de diseño y pruebas.

Para soportar todas estas características SysML ofrece una serie de diagramas agrupados en requisitos, estructura y comportamiento, FRIEDENTHAL, S. et al. (2012).

Desde el punto de vista de la aplicación de la eficiencia energética son importantes los diagramas estructurales, particularmente el diagrama de definición de bloques y el diagrama de bloques internos. El diagrama de definición de bloques describe la estructura o descomposición de una parte o de un sistema completo. El diagrama de bloques internos muestra la estructura interna de un bloque: sus partes y las conexiones o interfaces entre ellas.

Otro de los diagramas, que forma parte de SysML y que se usa en la evaluación de la eficiencia energética aquí propuesta, es el diagrama de restricciones. Los diagramas de restricciones se usan para mostrar relaciones o ecuaciones entre parámetros y propiedades de valor de los bloques que constituyen el sistema.

El bloque de tipo restricción se usa para definir las ecuaciones asignadas a las diversas partes de un sistema, y se complementa con los diagramas paramétricos necesarios que representan el uso de dichas ecuaciones en un contexto de análisis. En algunos casos, como en el ejemplo posterior, se evita el uso del diagrama paramétrico pues las ecuaciones se ejecutan con una herramienta informática en particular.

SysML es una notación estándar pero no una metodología que dicte un proceso de ingeniería de sistemas a aplicar. Existen diversas metodologías de ingeniería de sistemas basada en modelos, principalmente con notación estándar SysML pero también se usan otras notaciones, ESTEFAN, J.A. (2008).

En la línea de investigación de la que forma parte este trabajo, se extendió la metodología ISE&PPOOA (Integrated Systems Engineering and Pipelines of Processes in Object Oriented Architectures), utilizada en la ingeniería o reingeniería de productos complejos, FERNANDEZ, J.L. et al. (2016), para la evaluación de la eficiencia energética, con un enfoque sistémico, de instalaciones industriales. Los pasos de esta extensión de la metodología, que denominamos ISE&PPOOA/Energy, se describen brevemente a continuación, teniendo en cuenta que, de modo similar a un proyecto de reingeniería, se está aplicando a un sistema ya construido.

- Paso 1. Identificar el contexto y fronteras del sistema a analizar.
- Paso 2. Realizar los modelos de la arquitectura funcional, física del sistema, según la metodología ISE&PPOOA y usando la notación SysML.
- Paso 3. Identificar los principales flujos de materia y energía entre los bloques del sistema identificables.
- Paso 4. Detallar las ecuaciones, gráficos, tablas y correlaciones que determinan los valores desconocidos de los principales flujos de materia y energía.
- Paso 5. Determinar según los grados de libertad del sistema a evaluar para determinar si es posible resolverlo.
- Paso 6. Resolver las ecuaciones y correlaciones con las herramientas informáticas necesarias.

Brevemente se puede decir que los pasos anteriores conllevan la identificación del sistema a analizar y la representación de la arquitectura del sistema con técnicas de modelado de sistemas, particularmente utilizando los diagramas de definición de bloques y los diagramas de bloques internos soportados por el estándar SysML. Los pasos 3 y 4 se realizan identificando los principales flujos de materia y energía utilizando para ello la información de interfaces y conectores que se encuentran en los diagramas de bloques internos que modelan la arquitectura física del sistema.

En el paso 4 se elaboran las ecuaciones y correlaciones para obtener los valores desconocidos en cada uno de los flujos. También, si es necesario, se pueden asociar restricciones de proceso a algunas de las variables como podrían ser valores máximos de temperatura o presión. Se utilizan los bloques de tipo restricción y los diagramas paramétricos de SysML para su representación.

En el paso 5 se establece si el número de ecuaciones y correlaciones identificados en el paso 4 son suficientes para determinar las variables dependientes. Para tener una solución única se deberían tener cero grados de libertad, es decir el número de variables, incluyendo las cantidades de los balances de materia y de energía, debería ser igual al número de ecuaciones combinado con cualquier otra correlación que se use. Si el número de grados de libertad es positivo el sistema no puede ser resuelto lo que obliga a volver al paso 2 y realizar agrupaciones lógicas de bloques físicos, véase equipos, para reducir el número de variables dependientes. El enfoque sistémico basado en jerarquías y bloques es de gran utilidad para ello como se ve en un ejemplo anterior, FERNANDEZ J.L. y MORENO, L. (2017).

Por último en el paso 6 se resuelven las ecuaciones y correlaciones utilizando las herramientas informáticas adecuadas.

3. PROCESO DE PASTEURIZACIÓN. MODELOS Y DIAGRAMAS REPRESENTATIVOS.

3.1 Instalación de pasteurización y proceso

La planta de pasteurización a modelar y analizar es capaz de tratar 5000 kg de leche por hora en condiciones normales de operación. Esta leche es tratada para eliminar los patógenos que puedan ser perjudiciales para la salud, por lo que se debe cumplir el reglamento 605/2010 de la Comisión Europea del 2 de julio de 2010. En consecuencia, se tratará el producto hasta alcanzar las temperaturas necesarias para su correcta pasteurización.

La planta representada en la Figura 1, consta de un gran número de equipos que funcionan en sintonía para llevar a cabo su cometido:

- Depósito regulador de entrada.
- Bomba de impulsión de la mezcla
- Pasteurizador de placas con cinco secciones
- Equipo de calentamiento
- Válvula de recirculación
- Panel y elementos de control
- Tuberías y elementos de unión entre los distintos componentes de la planta

El proceso de pasteurización con los equipos de la Figura 1, es descrito en González Márquez como sigue: La mezcla llega a 40-50°C al depósito regulador (1) y una de las bombas del sistema (2) la envía a la sección regenerativa (5) del pasteurizador donde aumenta su temperatura de 40 a 67 °C en contracorriente con la mezcla ya calentada hasta 84 °C y que se enfría hasta 70°C. Cuando se tiene a una temperatura de 67°C pasa a la sección de calentamiento (6) donde su temperatura llega a 84°C en contracorriente con agua a 90°C. Esta agua caliente está en continua recirculación por la bomba (8) que la toma del calderín (9). Como el agua se enfría en el intercambio de calor con la mezcla, se necesita una inyección de vapor a través de una válvula reguladora (10) que está controlada de forma que la temperatura de la mezcla sea la fijada es decir 84°C.

En la sección (7) del pasteurizador de placas se mantiene normalmente durante 15 segundos, la temperatura de 84°C, lo que es suficiente para la destrucción de los organismos patógenos. Otra bomba (11) toma la mezcla pasteurizada y la envía nuevamente a la sección regenerativa (5) para que ceda calor a la entrante y se enfríe a unos 70°C.

En la primera sección de enfriamiento (4), la mezcla pasa de 67°C a 28°C en contracorriente con agua de la red a 18°C. Con objeto de no gastar una cantidad de agua elevada se puede instalar una torre de refrigeración para que baje su temperatura y pueda ser nuevamente utilizada. Sin embargo, como tras el transcurso del intercambio el agua no superará la temperatura de 40°C podrá ser vertida directamente al exterior ya que es el límite que marca la ley 5/2002, del 3 de junio, sobre vertido de aguas residuales industriales.

En la segunda sección de enfriamiento (3), la mezcla pasa de 28°C a 4°C, en contracorriente con agua muy fría a 2-3°C que es producida en la unidad de enfriamiento. De esta manera, sale una mezcla

pasteurizada y a una baja temperatura por la válvula (13) hacia los tanques donde se efectuará la maduración.

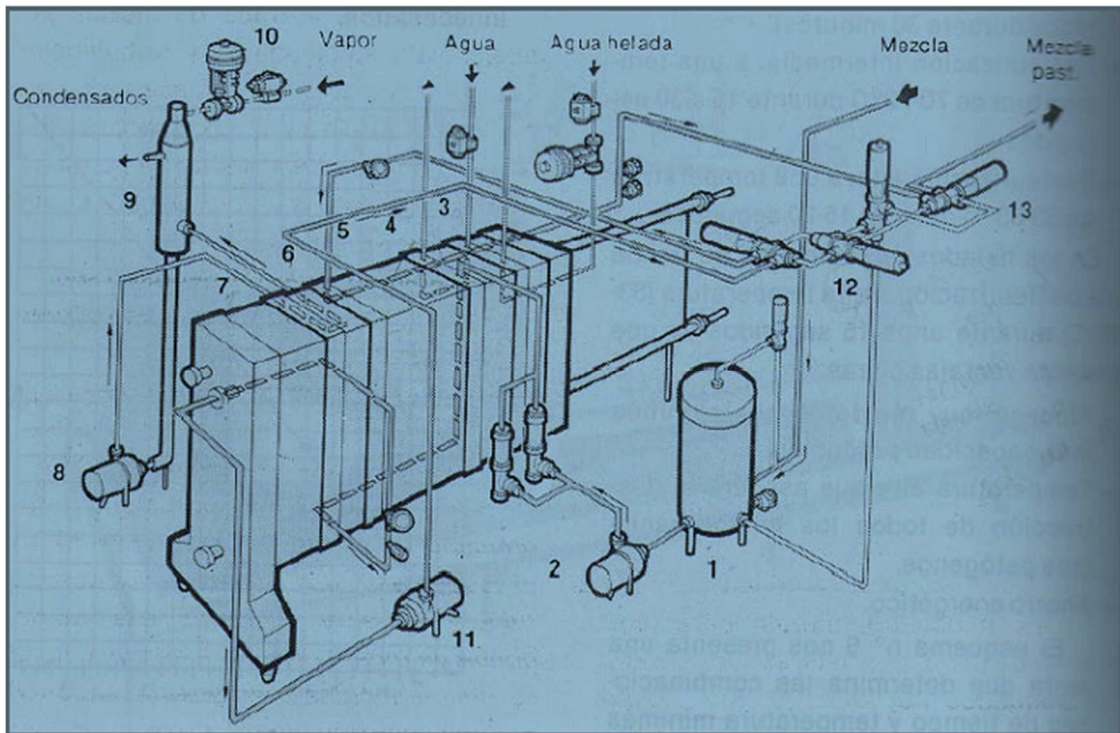


Figura 1. Planta de pasteurización (Fuente: GONZALEZ MARQUEZ, M.J. (2007))

Cuando la mezcla es calentada hasta 67°C , y antes de la pasteurización final, se envía a un homogeneizador y retorna, lo que no afecta al funcionamiento de la instalación. A la salida de la mezcla a 84°C de la sección de mantenimiento (7), ésta pasa por una válvula (12) antes de volver a la sección regenerativa (5). La misión de ésta válvula es recircular el producto al depósito inicial (1) en el supuesto de no haber alcanzado la temperatura de pasteurización deseada, por lo que el control de este proceso se realiza con un bucle de realimentación. De esta forma se asegura de forma automática que ninguna porción de la mezcla sale sin el tratamiento oportuno. La incorporación de esta sección regenerativa (5) donde la mezcla entrante es calentada por la que sale, supone un gran ahorro energético (80-90%), lo que reduce el coste de funcionamiento.

En condiciones normales de operación, la leche alcanza una temperatura de 84°C que debe mantenerse durante 15 segundos para cumplir con la temperatura/tiempo de destrucción de bacterias.

3.2 Diagramas representativos del modelado de la instalación y proceso de pasteurización

Los diagramas del modelo que se presentan a continuación ilustran los resultados de la aplicación del paso 2 de la metodología de ingeniería de sistemas ISE&PPOOA/ Energy, descrita en la sección anterior.

Se realiza un modelado de la instalación de pasteurización en estudio para identificar los principales bloques físicos, sus puertos o interfaces y cómo están conectados para intercambiar flujos de materia y energía. En el trabajo realizado también se han identificado los bloques funcionales también llamados unidades de operación por los ingenieros químicos y que forman parte del proceso de pasteurización de la leche.

La Figura 2 representa, mediante un diagrama de definición de bloques, en notación SysML, las partes constituyentes de la instalación. Este diagrama podría tener más niveles de descomposición si fuera necesario. Pero aquí debido al propósito del estudio, no ha sido necesario. El todo, es decir el sistema de pasteurización de la leche, tiene una relación de composición con sus partes, representada por rombos negros. Las partes se representan por bloques que pueden realizar más de un rol o papel, por ejemplo el bloque intercambiador de calor que puede ser calentador, regenerador o enfriador. Esto es importante a la hora de representar el diagrama de bloques internos, que se muestra en la Figura 5.

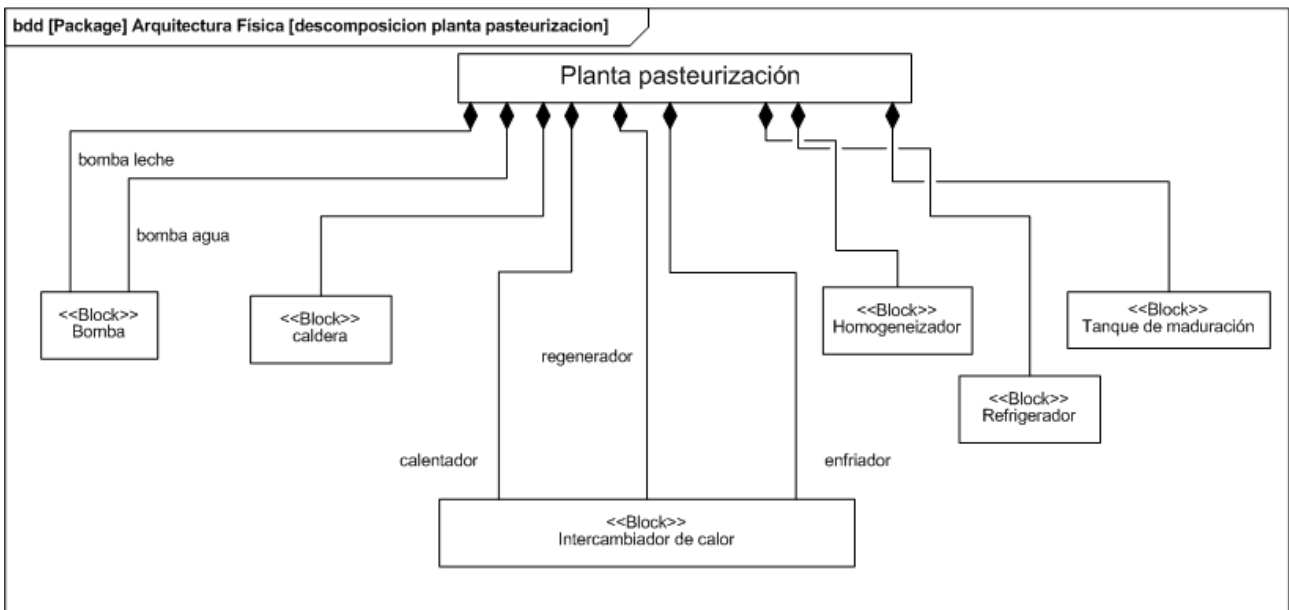


Figura 2. Diagrama de la descomposición física de la planta de pasteurización

La Figura 3 representa jerárquicamente las funciones o transformaciones principales del proceso de pasteurización. Estas funciones o transformaciones son asignadas a los elementos físicos de la planta o instalación que además están restringidos por ecuaciones y correlaciones que limitan su comportamiento como se verá en diagramas posteriores del modelo de la planta.

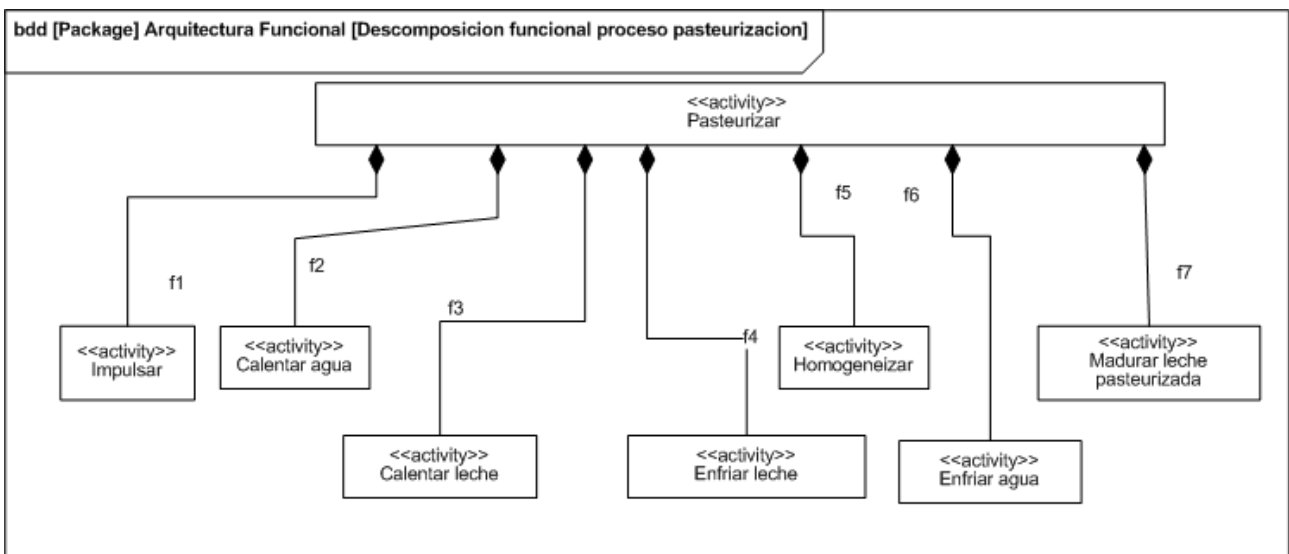


Figura 3. Diagrama de la descomposición funcional del proceso de pasteurización

La Figura 4 representa el diagrama de flujo funcional del proceso de pasteurización donde se modela la ejecución de las funciones u operaciones unitarias representadas en la Figura 3. En la activación de las funciones pueden ocurrir paralelismos o ejecuciones simultáneas de funciones como ocurre en los intercambiadores de calor. Por otra parte es importante destacar que el mismo diagrama representa la asignación de las funciones a los elementos físicos de la planta que las realizan, para ello en el estándar SysML se usa el término “allocate” y las particiones verticales tal como se representa en la Figura 4.

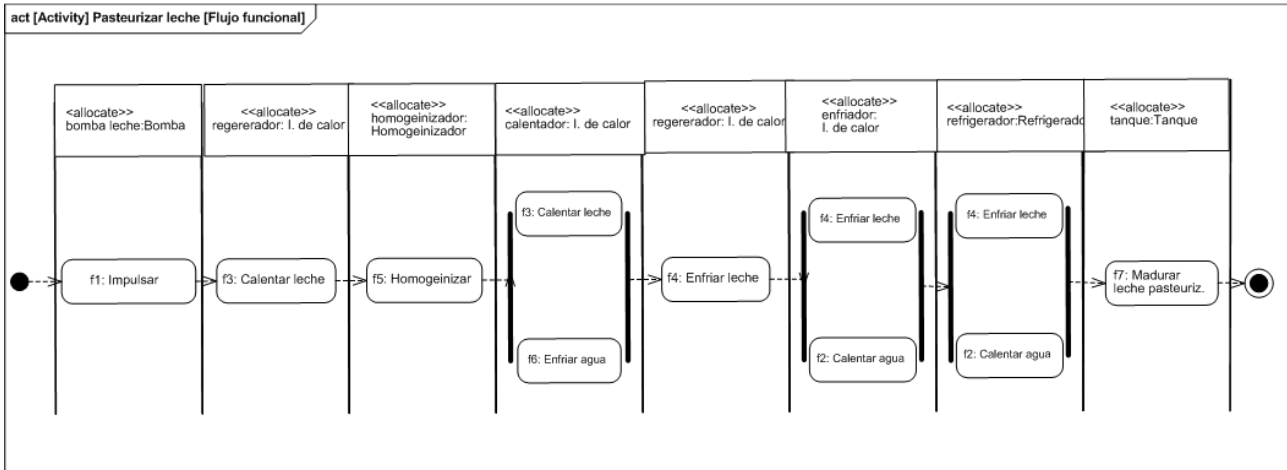


Figura 4. Diagrama de flujo funcional del proceso de pasteurización

La Figura 5 representa una vista bidimensional de como las partes o principales equipos de la planta de pasteurización se interconectan entre sí. Para ello se utilizan puertos de flujo y conectores en notación SysML. Cada flujo ya sea de agua o de leche se designa como m[], y puede ser un flujo de entrada o salida a un bloque.

Los bloques de la Figura 5 incluyen también las funcionalidades que desempeñan las partes de la planta de pasteurización. Esta asignación funcional es muy útil como información para reemplazar una parte o equipo por otro con las mismas funcionalidades e interfaces si fuera necesario por razones de eficiencia energética.

La aplicación de los pasos 1,2 y 3 de la metodología ISE&PPOOA/Energy han dado como resultado los diagramas en notación estándar SysML de las Figuras 2, 3, 4 y 5. Estos representan la visión sistémica de la planta donde se hace una especial distinción entre la funcionalidad de la planta de pasteurización y su realización física como un conjunto de equipos, partes desde el punto de vista sistémico, que se interconectan para intercambiar flujos de materia (agua o leche), energía (calor) y señales, que en este caso podrían ser medidas y señales de control propias de los SCADAs (“Supervisory Control and Data Acquisition System”) y PLCs. Estas señales no están representadas aquí pues el objetivo principal es representar los balances de materia y energía con fines de mejorar la eficiencia energética.

El siguiente paso a aplicar de la metodología ISE&PPOOA/Energy es el paso 4, donde se identifican las ecuaciones y correlaciones para obtener los valores desconocidos en cada uno de los flujos. También, si fuese necesario, se pueden asociar restricciones de proceso a algunas de las variables como podrían ser valores máximos de temperatura o presión. Se utilizan los bloques de tipo restricción de SysML para su representación.

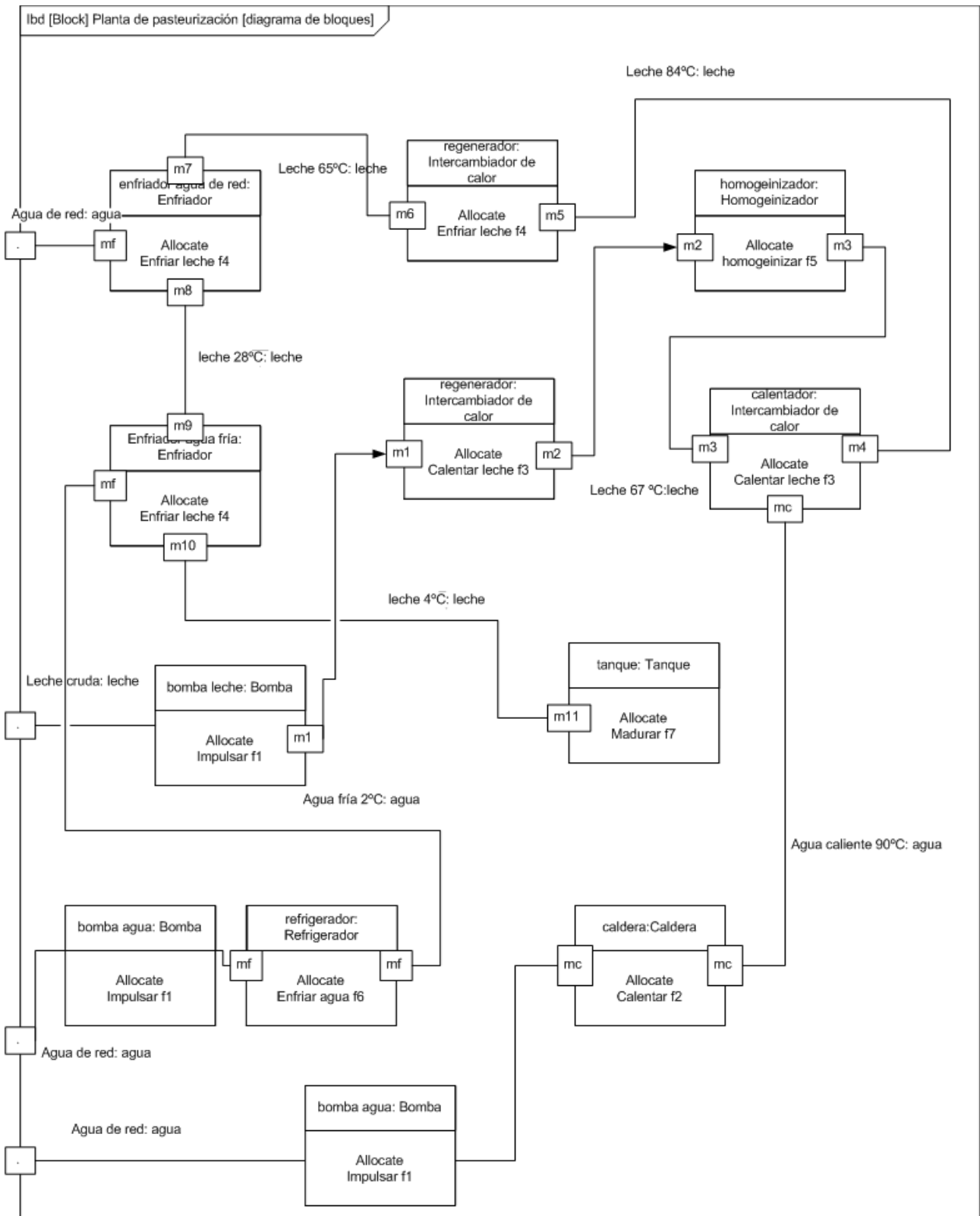


Figura 5. Diagrama de bloques de la planta de pasteurización

Los diagramas de definición de bloques con bloques de restricciones, que aquí por brevedad llamaremos diagramas de restricciones muestran las relaciones o ecuaciones entre variables y propiedades de valor de los bloques o partes, que en este caso conforman el sistema de pasteurización de la leche.

Los diagramas de restricciones permiten asociar ecuaciones a un bloque o parte del sistema es decir a los elementos físicos de la instalación. Teniendo en cuenta que se representan las variables o parámetros de cada uno de los bloques o partes así como las ecuaciones que los gobiernan, podemos determinar los grados de libertad ya sea de un bloque o de un conjunto de bloques que formasen un subsistema de la planta.

Si como establece la metodología ISE&PPOOA/Energy descrita en la sección 2, los grados de libertad que se calculan como la diferencia entre número de variables y número de ecuaciones y correlaciones, son mayor que cero, no podríamos resolver el sistema de ecuaciones y necesitaríamos ir a un nivel de detalle donde los grados de libertad fuesen cero.

El enfoque sistémico propuesto en la metodología ISE&PPOOA/Energy permite establecer el grado de detalle en la descripción de la planta que permite resolver las ecuaciones de los balances de materia y energía. De ahí la importancia de las representaciones jerárquicas de las partes constituyentes de la planta, subsistemas o equipos.

En primer lugar se representa en la Figura 6 el diagrama de restricciones del bloque bomba que representa las ecuaciones de la potencia que restringen el comportamiento de dicho bloque bomba o cualquiera de sus ejemplares.

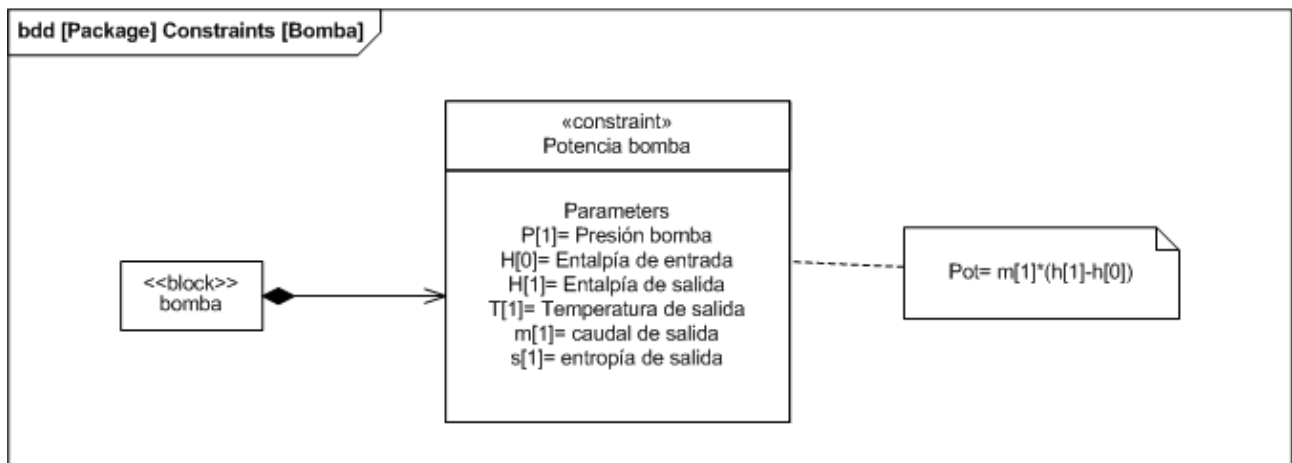


Figura 6. Diagrama de restricciones potencia de la bomba

En la Figura 7 se representan como diagrama de restricciones las ecuaciones que restringen el comportamiento del regenerador, enfriador y calentador que son roles del bloque intercambiador de calor.

Estas ecuaciones representan los balances de energía para los fluidos de tipo agua o leche que circular por dichos elementos.

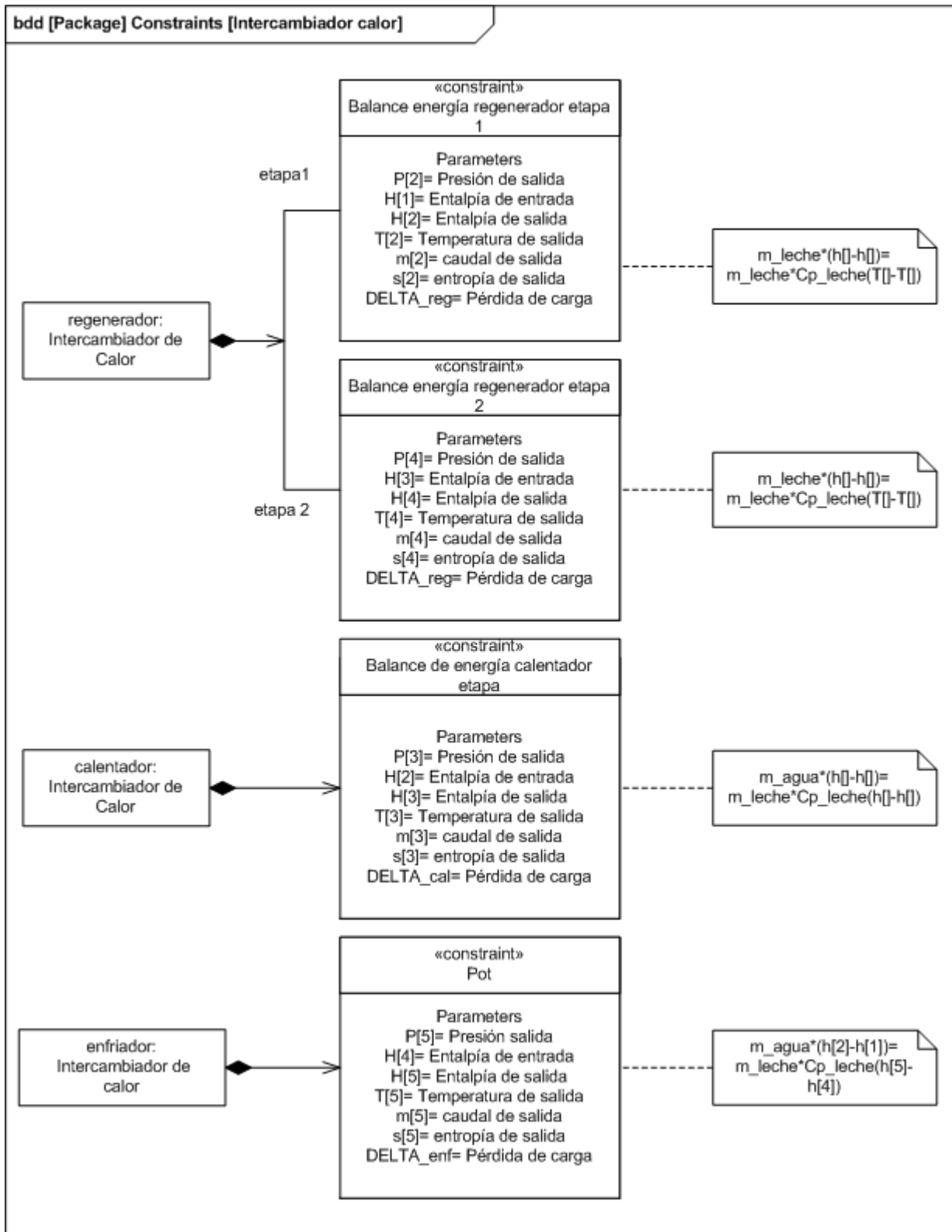


Figura 7. Diagrama de restricciones de los intercambiadores de calor

La Figura 8 representa el diagrama de restricciones de la caldera de la planta donde se representa el calor obtenido a partir del consumo de combustible.

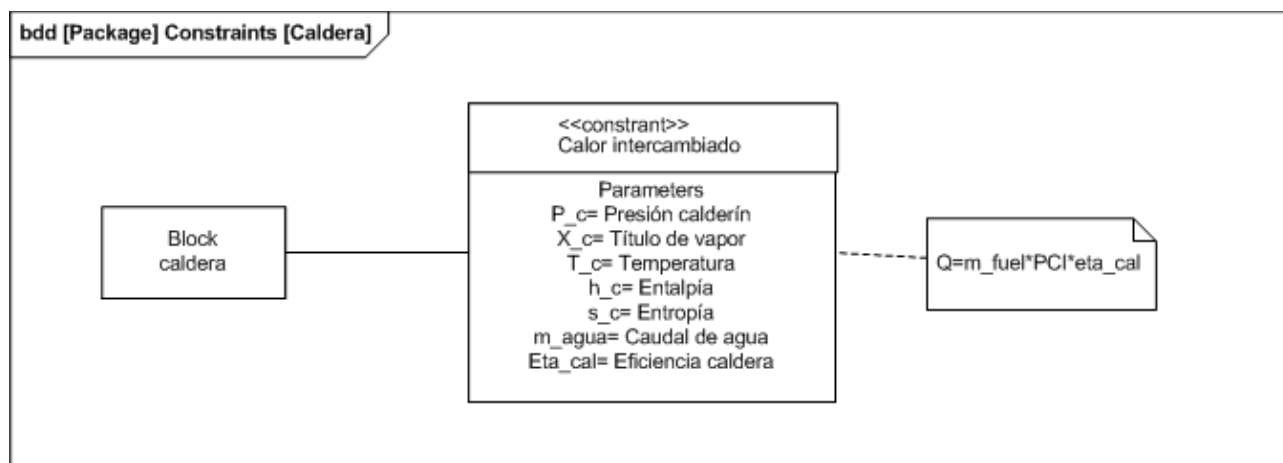


Figura 8. Diagrama de restricciones de la caldera

4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Para simular el proceso de pasteurización se utiliza “Engineering Equation Solver”, (EES) usado también en otro trabajo previo de aplicación del enfoque sistémico en generación de vapor, FERNANDEZ, J.L. y MORENO, L. (2017). EES permite resolver sistemas de ecuaciones no lineales y proporciona muchas funcionalidades útiles para la solución de ecuaciones de la termodinámica. Además almacena propiedades termodinámicas lo que facilita el trabajo y la necesidad de acudir a tablas o diagramas termodinámicos, que para este ejemplo serían necesarios.

Una vez que se han obtenido los resultados para las condiciones dadas y se ha observado que el modelo es coherente y realista, ya que se ajusta bastante a las condiciones reales de la planta, se puede analizar qué parámetros conllevarían a una mejora significativa de la eficiencia.

Para la resolución de las ecuaciones se contempla una división de las distintas etapas de la planta de pasteurización para que el proceso sea más intuitivo y los resultados queden más claros.

- Sección de calentamiento: Comprende la parte del intercambiador de calor donde la temperatura de la leche se incrementa gracias al intercambio con el agua procedente de la caldera.
- Sección regenerativa: Comprende la etapa en la que la temperatura de la leche sin pasteurizar se incrementa por la acción de la leche ya pasteurizada y caliente.
- Sección de enfriamiento I: Comprende la etapa en la que la leche ya pasteurizada a la salida del regenerador se enfría con agua a temperatura ambiente.
- Sección de enfriamiento II: Comprende la última etapa de intercambio de calor en la que la temperatura de la leche a la salida del enfriador se enfría aún más con agua fría producida en el refrigerador.

Por ello, se resume en la tabla los parámetros principales que se tendrán en cuenta para efectuar el estudio de la eficiencia de la planta.

Tabla I. Parámetros de operación de la planta ejemplo (Fuente: GONZALEZ MARQUEZ, M.J. (2007))

Fluido	Unidades	Sección de calentamiento		Sección regenerativa		Sección de enfriamiento I		Sección de enfriamiento II	
		Fluido frío	Fluido caliente	Fluido frío	Fluido caliente	Fluido frío	Fluido caliente	Fluido frío	Fluido caliente
Caudal	kg/h	5500	8259,67	5500	5500	5500	7792,53	5500	17492,82
T. Entrada	°C	67	90	50	84	18	70	2	28
T. Salida	°C	84	81	67	70	40	28	8	4
Intercambio Térmico	Kw	86,747		86,747		199		122,56	
Coefficiente Global	W/°C m2	1791,35		1095,06		1591,38		1483,55	
Número de placas de la sección		18		10		27		27	
Área activa	m2	9		4,87		13,79		14,09	

Se realizan pequeños cambios que no alteren ni pongan en peligro los equipos ya que están sujetos a unos límites térmicos que no deben ser sobrepasados. Para empezar, se decide cambiar la temperatura de entrada al calentador. Ésta se ve incrementada ligeramente desde los 67°C iniciales hasta los 67,25°C. No sólo ésta temperatura es modificada, la temperatura de salida del enfriador se reduce desde 28°C hasta 27,5°C.

Aparentemente estas modificaciones parecen insignificantes pero como se verá a continuación, son de gran importancia ya que reducen notablemente los costes de operación.

La siguiente tabla representa como quedan los parámetros tras aplicar los cambios mencionados.

Tabla II. Parámetros de operación después de los cambios

Fluido	Unidades	Sección de calentamiento		Sección regenerativa		Sección de enfriamiento I		Sección de enfriamiento II	
		Fluido frío	Fluido caliente	Fluido frío	Fluido caliente	Fluido frío	Fluido caliente	Fluido frío	Fluido caliente
Caudal	kg/h	5500	8141	5500	5500	5500	7845	5500	17132
T. Entrada	°C	67,25	90	50	84	18	66,8	2	27,5
T. Salida	°C	84	81	67,25	66,8	40	27,5	8	4
Intercambio Térmico	Kw	85,47		87,76		200,5		199,9	
Coefficiente Global	W/°C m2	1801		987,7		1626		1481	
Número de placas de la sección		13		13		27		28	
Área activa	m2	6,597		6,379		13,95		14,73	

Se observa que el caudal de fluido caliente (agua que entra en la caldera) en la sección de calentamiento se reduce en 118 kg/h. Esto se traduce en un ahorro de combustible en su uso para calentar el agua en la caldera. Se ve mejor con la siguiente ecuación, donde a mayor caudal de agua se necesitará mayor consumo de diésel:

$$\text{M}_{\text{diesel}} = (\text{m}_{\text{agua}} * (\text{h}_1 - \text{h}_0)) / (\text{rend}_{\text{diesel}} * \text{PCI})$$

Con esto se pasa de consumir 21.26 kg/h de diésel a 20.94 kg/h.

El número de placas totales de los intercambiadores se ve reducido en una unidad por lo que el límite físico de la instalación se ve respetado al no superar el número inicial.

El caudal en la sección de enfriamiento I aumenta 53 kg/h. Sin embargo, al tratarse de agua que no supera los 40°C puede verterse libremente al exterior sin necesidad de refrigeración.

El caudal en la sección de enfriamiento II disminuye 360 kg/h. Esto repercutirá en el gasto del refrigerador debido a que debe enfriar un caudal de agua menor.

$$\text{pot}_{\text{ref}} = (m[4]/3600) * 6 * C * 1000$$

Por tanto, en las condiciones iniciales se consumía 121.8 kWh frente a los 119,3 kWh que se consumen con las nuevas condiciones.

Estos cambios de operación también repercuten en la energía consumida por las bombas.

En la tabla siguiente se resume el ahorro que suponen los cambios de parámetros de operación.

Tabla III. Resumen de los ahorros obtenidos

		Condiciones iniciales	Condiciones finales
Bomba caldera	Altura manométrica (m)	58	58
	Caudal (m3/s)	0,0038	0,0038
	Potencia (W)	444,1	424,7
Bomba impulsión de leche	Altura manométrica (m)	210	210
	Caudal (m3/s)	0,0025	0,0025
	Potencia (W)	1956	1956
Bomba enfriamiento I	Altura manométrica (m)	58	58
	Caudal (m3/s)	0,0038	0,0038
	Potencia (W)	372,8	380
Bomba enfriamiento II	Altura manométrica (m)	58	58
	Caudal (m3/s)	0,00805	0,00805
	Potencia (W)	1005	943,4

Las ecuaciones que se usan para calcular los consumos son las siguientes:

$$\text{Pb} = \rho * g * Q * h$$

$$(Q1/Q2)^3 = (P1/P2)$$

Dadas estas ecuaciones se consigue calcular la diferencia de consumos entre las distintas condiciones de operación. Se reduce en 69 w/h el consumo.

Con estos datos de modo ilustrativo se puede calcular el porcentaje total de ahorro respecto a las condiciones iniciales y se obtiene un resultado de 1.87%.

5. CONCLUSIONES

Las acciones de mejora de la eficiencia energética de una instalación o parte de ella pueden ser realizadas mediante cambios operacionales, mejoras en los equipos o reemplazando éstos. Es obvio que un enfoque sólo técnico no sería suficiente cuando hay que tener en cuenta consideraciones económicas y medioambientales.

La aproximación sistémica, mostrada en este artículo, conlleva varias actividades integradas en un único proceso de ingeniería como son la definición de un contexto de análisis de la eficiencia, la realización de diagramas del sistema a analizar y la resolución de las ecuaciones de los balances de materia y energía.

Un aspecto importante de este enfoque es que los diagramas obtenidos se pueden considerar como la visualización de diversos aspectos de un único modelo de la planta es decir son representaciones consistentes de una única abstracción o modelo de la realidad en este caso la planta de pasteurización. La notación usada SysML es un estándar internacional lo que facilitaría la comprensión del modelo de la planta y sus diagramas por diversos colectivos.

Esta aproximación permite un estudio de alternativas que pueden ir desde el ajuste de parámetros de operación a reemplazar un equipo por otro más eficiente pero equivalente en funcionalidad e interfaces con otros elementos de la instalación, lo que queda reflejado en los diagramas de definición de bloques internos obtenidos por la aplicación de la ingeniería de sistemas basado en modelos.

6. REFERENCIAS

ESTEFAN, J.A. (2008), "Survey of Model-Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies," Rev. B, INCOSE Technical Publication, Document No.: INCOSE-TD-2007-003-01, International Council on Systems Engineering, San Diego, CA.

EUROPEAN COMMISSION (2009). "Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency". European IPPC Bureau.

FERNANDEZ, J.L. LOPEZ, J. GOMEZ, J.P. (2016). "Reengineering the Avionics of an Unmanned Aerial Vehicle". IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. Vol 31 4, P 6-13. (doi: 10.1109/MAES.2016.150048).

FERNANDEZ, J.L. MORENO, L. (2017). "A Systemic Approach for Energy Efficiency. The Case of a Steam Generation Process", 7th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management (CIIEM7), 17-19 July 2017, Canary Islands (Spain).

FRIEDENTHAL, S. MOORE, A. STEINER, R. (2012). "A Practical Guide to SysML. The Systems Modeling Language". Second edition. Morgan Kaufmann.

GONZALEZ MARQUEZ, M.J. (2007). "Diseño de un pasteurizador para helados". Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Química. Universidad de Cádiz.

OMG (2008). "Systems Modeling Language (OMG SysML)". Version 1,1. Object Management Group.