



**Escuela Superior
de Ingeniería y Tecnología**
Universidad de La Laguna

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química Industrial

Simulación del proceso de pasteurización de la leche

Adrián Acosta Pérez

San Cristóbal de La Laguna, 16 de junio de 2022

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores, en especial a José Juan Macías Hernández por su apoyo y guía para elaborar el presente Trabajo Fin de Grado.

También a mi madre, mi hermana y familia, que sin su apoyo no hubiese finalizado mi Grado en Ingeniería Química Industrial.

ÍNDICE

LISTADO DE GRÁFICOS Y TABLAS	4
LISTADO DE ECUACIONES	5
LISTADO DE ILUSTRACIONES	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS	8
3. LA LECHE	8
3.1. Historia de la Leche.....	9
3.2. Composición de la leche cruda.....	9
3.3. Propiedades fisicoquímicas de la leche.....	10
4. INFORMACIÓN DEL SECTOR LÁCTEO EN ESPAÑA	14
4.1. Producción del sector lácteo.....	14
4.2. El sector lácteo en España.....	15
4.3. Consumo nacional de productos lácteos	15
4.4. Comercio exterior.....	16
5. PROCESO Y TÉCNICAS APLICADAS	17
5.1. Descripción del proceso productivo.....	17
5.2. Tratamiento térmico: La Pasteurización.	18
5.3. Sistemas de calentamiento	18
5.4. Elección de intercambiador.....	19
5.5. Tubo de mantenimiento	19
5.6. Etapas posteriores a la pasterización.....	20
6. DISEÑO DEL EQUIPO DE PASTEURIZACIÓN	21
7. MODELO MATEMÁTICO	22
8. CÁLCULOS	24
8.1. Datos de partida.....	24
8.2. Sección de calentamiento	25
8.3. Sección regenerativa	27
8.4. Sección de enfriamiento	30
8.5. Tubo de mantenimiento	32
8.6. Diámetro de las conducciones	34
9. SIMULACIÓN	34

9.1.	Inicio y creación del componente “leche”	34
9.2.	Elección del paquete de propiedades	36
9.3.	Obtención de las propiedades de los componentes	37
9.4.	Metodología seguida para la simulación.	40
-	Estado Estacionario	40
-	Modo Dinámico	46
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
10.1.	Resultados obtenidos	54
10.2.	Conclusiones.....	56
10.3.	Conclusions.....	56
11.	BIBLIOGRAFÍA	57
12.	ANEXO	59

LISTADO DE GRÁFICOS Y TABLAS

Figura 1: Promedio de la composición de la leche.

Figura 2: Clasificación de los microorganismos en función de la temperatura de crecimiento.

Figura 3: Entregas de Leche 2021.

Figura 4: Entregas de Leche de vaca.

Figura 5: Consumo hogares productos lácteos.

Figura 6: Balanza comercial productos lácteos.

Figura 7: Datos del intercambiador de calor.

Figura 8: Propiedades de los fluidos y relación de temperaturas. Sección de calentamiento.

Figura 9: Propiedades de los fluidos y relación de temperaturas. Sección regenerativa.

Figura 10: Propiedades de los fluidos y relación de temperaturas. Sección de enfriamiento.

Figura 11: Diámetros de tuberías.

Figura 12: Viscosidad de la leche en función de la temperatura.

Figura 13: Conductividad térmica de la leche en función de la temperatura.

Figura 14: Especificaciones del controlador A. Caliente FC.

Figura 15: Especificaciones del controlador A. Fría FC.

Figura 16: Especificaciones del controlador Leche FC.

Figura 17: Especificaciones del controlador Caldera TC.

Figura 18: Especificaciones del controlador Refrigerante TC.

Figura 19: Cv de las válvulas.

Figura 20: Resultados de la Sección de calentamiento.

Figura 21: Resultados de la Sección regenerativa.

Figura 22: Resultados de la Sección enfriamiento.

Figura 23: Resultados de las secciones en modo dinámico, modificando el UA de los intercambiadores de calor.

Figura 24: Factor de corrección para intercambiadores de 1 paso por carcasa y 2 por tubos.

LISTADO DE ECUACIONES

Viscosidad de la leche.

Conductividad térmica de la leche.

Balance de energía.

Calor ganado por el fluido frío.

Ecuación de Fourier.

Diferencia de temperatura media logarítmica.

Capacidad (R).

Efectividad (E).

Caída de presión.

Factor f para la caída de presión.

Volumen del tubo de mantenimiento.

Longitud del tubo de mantenimiento.

Capacidad calorífica del agua.

Densidad molar del agua.

Conductividad térmica del agua.

Viscosidad del agua.

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Imagen 1: Diseño del equipo pasteurizador.

Imagen 2: Simulation Basis Manager.

Imagen 3: Component List.

Imagen 4: Hypo Component.

Imagen 5: Component Builder - Leche.

Imagen 6: Componente Leche.

Imagen 7: Componente Leche Hypogroup.

Imagen 8: Fluid Package.

Imagen 9: Fluid Package - Tabular.

Imagen 10: Tabular Package.

Imagen 11: Viscosidad de la leche.

Imagen 12: Conductividad térmica de la leche.

Imagen 13: Tanque de balance en UniSim.

Imagen 14: Intercambiador de calor de la sección de calentamiento. (1).

Imagen 15: Intercambiador de calor de la sección de calentamiento. (2).

Imagen 16: Intercambiador de calor de la sección regenerativa. (1).

Imagen 17: Intercambiador de calor de la sección regenerativa. (2).

Imagen 18: Tubo de mantenimiento.

Imagen 19: Distribución de las corrientes tras el tubo de retención.

Imagen 20: PFD, sección de calentamiento.

Imagen 21: PFD, sección regenerativa.

Imagen 22: PFD, sección de enfriamiento.

Imagen 23: Corrientes.

Imagen 24: "Dynamics Assistant".

Imagen 25: Nivel de líquido de iniciación del tanque de balance.

Imagen 26: FCV For Caldera.

Imagen 27: FCV For Refrigerante.

Imagen 28: Fórmulas en el "Spreadsheet" para el control de la recirculación.

Imagen 29: Resultados en el Spreadsheet en un momento concreto. (VLV-103 abierta y VLV-104 cerrada).

Imagen 30: Pestaña "Dynamics" de la VLV-101.

RESUMEN

En la actualidad el uso de simuladores de proceso es algo común a nivel industrial, ya que permiten predecir el comportamiento de cualquier etapa del proceso. La utilización, en este caso, del UniSim, un simulador popular disponible bajo licencia, que normalmente se utiliza para aplicaciones petroquímicas, permite obtener resultados coherentes a la realidad para el proceso de pasteurización de la leche. Tras observar la bibliografía adecuada y obtener un modelo matemático con el que definir los diferentes intercambios de calor, se procede a modelar el comportamiento de los componentes (agua y leche) a través del simulador, mediante el cual se obtienen las propiedades del agua. Finalmente, los resultados logrados con el simulador son muy próximos a los del modelo matemático propuesto.

ABSTRACT

Currently, the use of process simulators is common at an industrial level, since they allow predicting the behavior of any stage of the process. The use, in this case, of UniSim, a popular simulator available under license, which is normally used for petrochemical applications, allows obtaining results consistent to reality for the milk pasteurization process. After observing the appropriate literature and obtaining a mathematical model with which to define the different heat exchanges, we proceed to model the behavior of the components (water and milk) through the simulator, through which the properties of water are obtained. Finally, the results achieved with the simulator are very close to those of the proposed mathematical model.

1. INTRODUCCIÓN

La pasteurización de la leche es uno de los procesos más importantes de la historia. A través de ella se eliminan los patógenos que se encuentran presentes en la leche, lo que permite consumirla en buen estado.

En la mayoría de las aplicaciones industriales alimentarias se utilizan intercambiadores de calor de placas en lugar de los de carcasa y tubo o tubos concéntricos, debido a los elevados coeficientes de calor de los primeros. Esta característica los hace más compactos. Además, son más fáciles de limpiar y permiten enfriar o calentar una corriente con solo 1 °C de diferencia.

Para su diseño, habría que considerar algunas características de los componentes a utilizar (densidades, capacidades caloríficas...) y también las temperaturas del proceso, las cuales están reglamentadas.

Por otro lado, la simulación es una herramienta muy utilizada en la industria, ya que permite analizar si la planta que se va a instalar cumple los requisitos propuestos, si es rentable, etc.

En el presente Trabajo Fin de Grado se realiza la simulación del proceso de pasteurización de la leche en estado estacionario y modo dinámico mediante el UniSim Design R390.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Realizar la simulación del proceso de pasteurización de la leche mediante el simulador UniSim Design.

2.2. Objetivos específicos

- Creación del componente leche.
- Diseño del intercambiador de placas, mediante el modelo matemático.
- Conocer las funciones que utiliza el simulador para obtener las distintas propiedades de los componentes.

3. LA LECHE

La leche natural es el producto que procede de las hembras mamíferas (generalmente vacas y cabras) tras ordeñarlas. Este proceso debe realizarse sin interrupciones y de manera higiénica para que el producto final no se vea adulterado. (López Ruiz & Barriga Velo, 2016, p. 5).

3.1. Historia de la Leche.

En el neolítico (9000 a.C), cuando tuvo lugar la domesticación de los animales, el ser humano descubrió el ordeño y diversas formas para utilizar la leche y conservarla.

Tras este hecho, en Sumeria (3000-2350 a.C) y Babilonia (2300 a.C) se encontraron los primeros escritos sobre la leche como alimento. Los judíos evaluaban su fortuna en función de la leche que producían sus rebaños y consideraban a la vaca un animal sagrado.

En Calcuta y Nueva Delhi, las vacas podían pasear libremente por sus calles, ya que eran consideradas el mayor símbolo de riqueza. Mientras que, en la antigua Grecia, eran las cabras y las ovejas (debido a su mejor adaptación al clima) las que producían la leche destinada a hacer queso.

Los romanos la consideraban un alimento básico y la utilizaban para cocinar, al igual que el queso.

A comienzos del siglo XIX, Nicolas Appert fabricó las primeras latas de conserva debido al aumento de la ingesta de leche, producido por el desarrollo de las ciudades. Utilizó el baño maría para conservar alimentos cocinados, guardados en botellas de cristal que luego cerraba con corchos encerados.

Sin embargo, debido a este aumento de demanda, la calidad iba decayendo, provocando que la mortalidad infantil, en Manhattan, por leche en mal estado llegara a un 50%. Hasta que, en 1864, Pasteur, descubrió lo que hoy se conoce como "Pasteurización", aunque tardó un tiempo en aplicarlo a la leche (centrándose primero en el vino).

La pasteurización se convirtió en un tema de salud pública, teniendo una gran incidencia en la medicina en general. La teoría de Pasteur explicaba el origen de las enfermedades y la fermentación (todo debido a los microorganismos patógenos). (Alonso, 2019; Guillén Valera, Sánchez-Monge, Callejo Mora, Gallardo & Sevilla Martínez, 2001).

3.2. Composición de la leche cruda

Según establecen López Ruiz y Barriga Velo (2016), la leche tiene una composición compleja no definida, (las propiedades se mueven en un rango) que depende de la zona de producción, la alimentación del ganado... Es por ello por lo que se toman valores medios.

Componentes (%)	Tipo de leche		
	Vaca	Cabra	Oveja
Agua	87,5	87,9	80,1
Proteínas	3,2	3,4	6,2
Grasas	3,6	3,8	7,9
Hidratos de carbono	4,7	4,1	4,9
Caseína	2,6	2,4	4,2
Albúmina, globulina	0,6	0,6	1,0
Cenizas	0,7	0,8	0,9

Figura 1: Promedio de la composición de la leche. Reproducido de LA LECHE COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS, Á.L.R. & D.B.V., 2016, Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/436502c6-f47c-42ab-a053-f3ab26dee712/download>. Copyright 2016 por Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica. Reproducido con permiso.

Se observa, en la Figura 1, que el componente principal de la leche es el agua, que permite mantener a las grasas en emulsión y a las proteínas en dispersión.

Desde el punto de vista nutritivo, las proteínas y las vitaminas son el componente fundamental. Además, la degradación de las primeras influye en el olor y el sabor de la leche.

En cuanto a las grasas, son importantes debido a los aspectos nutritivos, económicos, y a las características físicas y organolépticas a las que da lugar. La cantidad de esta depende fundamentalmente de la raza, la genética, la salud y la alimentación del animal, aunque también de la estación del año.

Dentro de los hidratos de carbono hay que destacar la lactosa, que solo se encuentra en la leche y es el componente principal después del agua. Está formada por la unión de la galactosa y glucosa. Algunos microorganismos pueden fermentar este azúcar para producir ácido láctico, acético, etanol...

Respecto a las enzimas, su actividad depende del pH y de la temperatura, algunas tienen características sorprendentes como presentar protección limitada contra las bacterias, provocar modificaciones a nivel organoléptico y en el caso de la fosfatasa alcalina indica la eficacia del tratamiento térmico de la pasteurización, ya que se inactiva.

3.3. Propiedades fisicoquímicas de la leche

La estabilidad de las proteínas va a condicionar las propiedades fisicoquímicas principales de la leche:

1) Punto de congelación

Tiene un punto de congelación más bajo que el agua, debido a la existencia de las diferentes sustancias disueltas. Es una de las características más constante de la leche y su valor medio se encuentra en -0.56°C .

2) Punto de ebullición

El punto de ebullición de la leche en cambio es más elevado que el del agua por la misma razón que el punto de congelación es menor. Se sitúa en $100,17^{\circ}\text{C}$ a nivel del mar.

3) Densidad

La densidad depende de varios factores (temperatura, concentración de sólidos disueltos, contenido graso), sin embargo, en la bibliografía consultada no se han encontrado valores correlaciones respecto a esta, por lo que se ha adoptado un valor constante de 1040 kg/m^3 , tal como establece Luis Gutiérrez Fragosa en su tesis, "Diseño y optimización de un sistema pasteurizador de leche para productores pequeños, mediante simulación en EES".

4) Viscosidad

La leche es más viscosa que el agua, debido a la materia grasa en estado globular y a las macromoléculas proteicas presentes en la leche. La viscosidad disminuye al aumentar la temperatura hasta los 70°C , cuando comienza a aumentar. Kessler, 1981, publicó gráficos experimentales sobre los cambios de la viscosidad de la leche con respecto a la temperatura, Luis Gutiérrez Fragosa en su tesis, "Diseño y optimización de un sistema pasteurizador de leche para productores pequeños, mediante simulación en EES" los interpretó y obtuvo una función polinómica. (Temperatura en $^{\circ}\text{C}$).

$$\text{Viscosidad Leche [Pa s]} = 0,00320429 - 0,0000643095 T + 0,000000416667 T^2$$

5) Conductividad térmica

Fernández-Martin y Montes (1972), publicaron gráficos experimentales sobre los cambios de la conductividad térmica de la leche con respecto a la temperatura. Luis Gutiérrez Fragosa en su tesis, "Diseño y optimización de un sistema pasteurizador de leche para productores pequeños, mediante simulación en EES" los interpretó y obtuvo una función polinómica. (Temperatura en $^{\circ}\text{C}$).

$$\text{Conductividad térmica } \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \right] = 0,51708411 + 0,00164856 T - 0,00000534 T^2$$

6) Calor específico

No se encontraron correlaciones del C_p de la leche con respecto a la temperatura, por lo que se adoptó un valor constante de $3890 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, que es el valor que utiliza Luis Gutiérrez Fragosa en su tesis, "Diseño y optimización de un sistema pasteurizador de leche para productores pequeños, mediante simulación en EES".

7) pH

Normalmente la leche es ácida, esta característica es muy dependiente de la temperatura, además su valor varía según la especie.

- Leche de vaca: 6,65-6,71.
- Leche de cabra: 6,50-6,80.
- Leche de oveja: 6,51-6,85.

8) Apariencia

La leche presenta un color blanco (realmente es opaca), porque las caseínas se organizan en micelas y dispersan la luz, al igual que los glóbulos grasos que favorecen a la dispersión.

Cuando la leche se encuentra en mal estado, se vuelve grisácea.

- Propiedades microbiológicas

La leche es un medio perfecto para el crecimiento de microorganismos (bacterias, hongos, virus y levaduras. Algunos pueden ser alterantes o patógenos, mientras que otros beneficiosos.

- Factores de desarrollo

Los microorganismos pueden verse afectados por factores como la temperatura, el oxígeno (extrínsecos) o por el contenido en agua de la leche, su pH (intrínsecos)

a) Temperatura

Todos los microorganismos tienen un rango de temperatura a la cual pueden vivir y desarrollarse.

Rangos de temperatura (°C) para el crecimiento de los microorganismos			
Grupos	Mínima	Óptima	Máxima
Termófilos	40/45	55-75	60-90
Mesófilos	5/15	30-40	40-47
Psicrótrofos	-5/+5	25-30	30-35
Psicrófilos	-5/+5	12-15	15-20

Figura 2: Clasificación de los microorganismos en función de la temperatura de crecimiento.

Reproducido de LA LECHE COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS, Á.L.R. & D.B.V., 2016, Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/436502c6-f47c-42ab-a053-f3ab26dee712/download>. Copyright 2016 por Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica. Reproducido con permiso.

b) Oxígeno

- Aerobios estrictos: El oxígeno es necesario para que puedan crecer y desarrollarse. Ejemplos: Pseudomonas, Micrococcus.
- Anaerobios estrictos: Crecen exclusivamente si no existe oxígeno. Ejemplos: Clostridium, Propionibacterium.
- Anaerobios facultativos: Pueden desarrollarse con o sin oxígeno, aunque crecen mejor con él. Ejemplo: Enterobacterias.
- Microaerófilos: Les basta una fracción pequeña de oxígeno para crecer. Ejemplos: Streptococcus, Pediococcus.
- Anaerobios aerotolerantes: Indistintamente crecen en presencia o ausencia de oxígeno (No se desarrollan mejor con él), como los Actinomicetes.

c) Contenido en agua

Más de un 80% de agua constituye la leche. La actividad acuosa (Agua disponible para el crecimiento microbiano) de la leche está estimada en 0,99, la del agua pura es 1,00. Los microorganismos dependen del agua para desarrollar sus actividades metabólicas.

Los mohos y las levaduras son más importantes en productos deshidratados que en leche líquida, debido a la gran humedad de esta.

d) Acidez

El pH de la leche normal es ligeramente ácido. Aunque son las bacterias, específicamente las ácido lácticas las que se ven favorecidas para crecer en la leche a pH normal.

- Clasificación

- Bacterias
- Levaduras

No se encuentran en la leche en circunstancias ordinarias, pero producen un olor agrio y manchas rojas y amarillas.

➤ Mohos

Para elaborar queso se utilizan la “*Penicillium candidum*” y la “*Geotrichum candidum*”. No tienen relevancia en leche líquida.

➤ Virus

Se denominan bacteriófagos, aquellos virus que afectan a la leche. Atacan principalmente a las bacterias que componen los fermentos lácticos (Son sus parásitos naturales). (López Ruiz & Barriga Velo, 2016; Gutiérrez Fragosa, 2010).

4. INFORMACIÓN DEL SECTOR LÁCTEO EN ESPAÑA

Se entiende por sector lácteo como el sector industrial elaborador de productos alimenticios procedentes de la leche. Dentro de este, se encuadran varias industrias y productos finales, como la fabricación de leche envasada para consumo, quesos, yogur, helados...

4.1. Producción del sector lácteo

La mayor parte de la leche producida en España tiene origen vacuno:

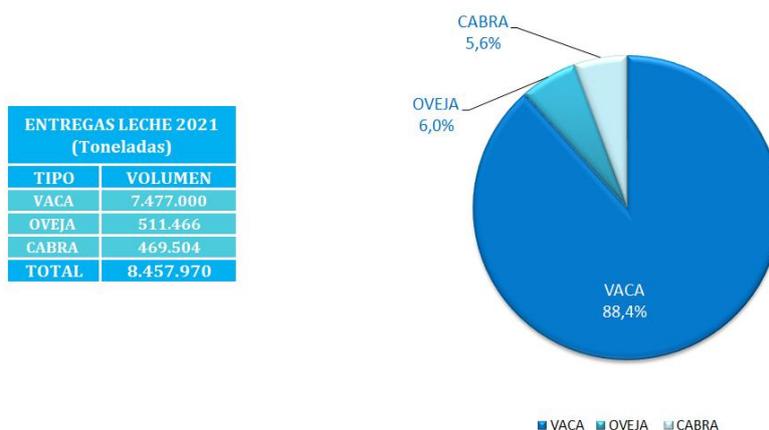


Figura 3: Entregas de Leche 2021. Reproducido de FeNIL, 2022, Recuperado de <http://fenil.org/sector-lacteo-espana/>

. Copyright 2016 por FeNIL. Reproducido con permiso.

Según establece FeNIL (2022), “La producción española de leche de vaca se sitúa en torno al 5% del total comunitario (Dentro de la UE), frente al 15% y 20% que representan la leche de oveja y de cabra, respectivamente. Actualmente, España es el segundo país de la UE que más leche de oveja y cabra produce.”

La producción de leche de vaca en España ha sido creciente a lo largo de los últimos años llegando a rozar las 7,5 millones de toneladas entregadas.

ENTREGAS LECHE VACA (Toneladas)	
AÑO	VOLUMEN
2012	6.301.148
2013	6.304.887
2014	6.651.349
2015	6.793.275
2016	6.886.386
2017	7.021.900
2018	7.117.700
2019	7.230.900
2020	7.405.215
2021	7.477.000



Figura 4: Entregas de Leche de vaca. Reproducido de FeNIL, 2022, Recuperado de <http://fenil.org/sector-lacteo-espana/>

. Copyright 2016 por FeNIL. Reproducido con permiso.

4.2. El sector lácteo en España

El sector lácteo en España es estratégico desde un punto de vista económico y social, ya que factura en torno a 13000 millones de euros al año y genera más de 60000 puestos de trabajos.

Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), en 2021, 19800 ganaderos realizaron entregas de leche. Su distribución en función de la especie fue la siguiente:

- Leche de vaca: 11.800 ganaderos (59,6%).
- Leche de cabra: 4.800 ganaderos (24,24%).
- Leche de oveja: 3.200 ganaderos (16,16%).

Así mismo en función de la especie, las explotaciones ganaderas se encuentran concentradas en determinados territorios:

- Leche de vaca: Galicia, Asturias, Cantabria, Castilla y León, País Vasco y Andalucía.
- Leche de oveja: Castilla y León y Castilla la Mancha.
- Leche de cabra: Andalucía, Castilla la Mancha y Extremadura. (FeNIL ,2022).

4.3. Consumo nacional de productos lácteos

Según datos del MAPA, se ha producido una caída del consumo de productos lácteos hasta el 2016, es por ello por lo que el sector se ha propuesto aumentar el consumo interior a corto y medio plazo. Los tres productos más importantes, en cuanto a volumen y consumo per

cápita, han sido la leche, el yogur y el queso, y todos han sufrido una caída, mostrando signos de recuperación en 2020. (FeNIL ,2022).

CONSUMO HOGARES PRODUCTOS LÁCTEOS (Toneladas y Kg. per cápita)								
Categoría de producto	2010		2011		2012		2013	
	Total	Per cápita						
Leche líquida	3.527.525	76,78	3.418.901	74,51	3.404.057	73,88	3.362.573	74,18
Yogur y LF	717.700	15,64	739.249	16,11	724.174	15,70	704.394	15,54
Queso	360.270	7,85	368.070	8,03	365.794	7,95	365.018	8,05
Nata	40.593	0,89	41.460	0,90	44.084	0,96	47.478	1,05
Mantequilla	11.072	0,25	12.219	0,27	13.872	0,30	14.059	0,32
Otros prod. lácteos (*)	588.811	12,79	589.208	12,81	614.191	13,31	634.682	13,98
TOTAL	5.245.971	114,20	5.169.108	112,63	5.166.172	112,10	5.128.203	113,12

CONSUMO HOGARES PRODUCTOS LÁCTEOS (Toneladas y Kg. per cápita)								
Categoría de producto	2014		2015		2016		2017	
	Total	Per cápita						
Leche líquida	3.286.777	73,32	3.270.930	73,32	3.198.552	72,85	3.187.960	69,91
Yogur y LF	687.973	15,32	680.442	15,25	673.435	15,36	660.162	14,46
Queso	347.764	7,77	346.965	7,78	351.994	8,02	349.479	7,66
Nata	46.386	1,05	45.789	1,02	45.757	1,07	44.866	0,97
Mantequilla	14.037	0,33	13.654	0,31	13.913	0,33	14.587	0,32
Otros prod. lácteos (*)	635.938	14,18	661.974	14,82	640.656	14,59	680.390	14,92
TOTAL	5.018.876	111,97	5.019.754	112,50	4.924.307	112,22	4.937.444	108,24

CONSUMO HOGARES PRODUCTOS LÁCTEOS (Toneladas y Kg. per cápita)						
Categoría de producto	2018		2019		2020	
	Total	Per cápita	Total	Per cápita	Total	Per cápita
Leche líquida	3.196.815	69,82	3.194.952	69,27	3.420.638	73,99
Yogur y LF	666.904	14,58	664.932	14,44	694.862	15,04
Queso	354.415	7,74	359.935	7,80	406.861	8,80
Nata	47.442	1,05	46.617	1,02	56.858	1,21
Mantequilla	15.562	0,35	15.895	0,34	21.081	0,47
Otros prod. lácteos (*)	692.158	15,11	678.825	14,76	692.384	14,98
TOTAL	4.973.296	108,65	4.961.156	107,63	5.292.684	114,49

Figura 5: Consumo hogares productos lácteos. Reproducido de FeNIL, 2022, Recuperado de

<http://fenil.org/sector-lacteo-espana/>

. Copyright 2016 por FeNIL. Reproducido con permiso.

4.4. Comercio exterior

Las exportaciones españolas de productos lácteos han aumentado durante los últimos años, algo que ha sido clave ya que la producción está aumentando y el consumo interior disminuyendo. El volumen de ventas a países fuera de la UE está en torno al 15%, mientras que las importaciones están menos diversificadas, llegando a tener como origen más del 98% de países de la UE.

Atendiendo a datos de la Dirección General de Aduanas, la balanza comercial española viene experimentando desde el año 2010 una mejora continua, habiéndose reducido nuestro déficit comercial de productos lácteos en torno a un 70% desde principios de la década. (FeNIL, 2022).

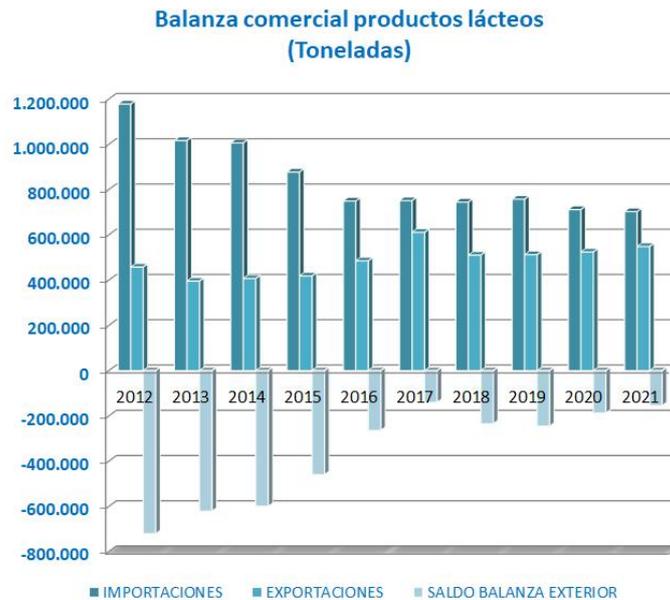


Figura 6: Balanza comercial productos lácteos. Reproducido de FeNIL, 2022, Recuperado de <http://fenil.org/sector-lacteo-espana/>

. Copyright 2016 por FeNIL. Reproducido con permiso.

5. PROCESO Y TÉCNICAS APLICADAS

Como se explicaba anteriormente, la leche sufre un deterioro rápido y hay que tratarla para que se conserve durante más tiempo, se eliminen los contaminantes que pueda tener y se pueda consumir.

La legislación indica que el tratamiento térmico es un proceso de calentamiento de la leche que inactiva la enzima de la fosfatasa tras su aplicación. Existen varios tipos de tratamientos, que se distinguen por la temperatura alcanzada y el tiempo de aplicación de esta.

Se obtendrán tres tipos de leche en función del tratamiento térmico que se le dé a esta: leche pasteurizada, leche UHT y leche esterilizada. (Avellaneda Bargués et al., 2005).

5.1. Descripción del proceso productivo

Cuando se recibe la leche, esta se almacena en tanques refrigerados hasta que entre en el proceso. Luego es filtrada, para eliminar sólidos grandes, y clarificada, eliminando así la suciedad residual. A continuación, la leche puede sufrir un acondicionamiento térmico para evitar el crecimiento de microorganismos. Tras esto, se separa la nata (Desnatado) y se ajusta el contenido graso final de la leche (Estandarización). Finalmente, se realiza el tratamiento térmico de estabilización microbiológica (pasteurización, esterilización o UHT). (Avellaneda Bargués et al., 2005).

5.2. Tratamiento térmico: La Pasteurización.

El tratamiento térmico se realiza para eliminar los microorganismos que pueda tener la leche y también para inactivar las enzimas lácteas que se encuentran presentes.

Dependiendo de la calidad de la leche cruda, del producto final que se pretende conseguir, de la cantidad de gérmenes que se quieren eliminar y de lo especificado en la legislación, se pueden utilizar diferentes tratamientos (nombrados anteriormente) que se diferencian por la relación tiempo-temperatura utilizado.

La leche pasteurizada es leche (entera, desnatada o semidesnatada) sometida a un proceso de eliminación de microorganismos patógenos y flora que no tiene importancia, sin sufrir alteraciones sensibles en sus características biológicas y nutritivas.

La legislación española considera que la leche pasteurizada debe haberse obtenido mediante un calentamiento regular de forma continuada (como mínimo 71,7°C durante quince segundos) o un procedimiento de pasteurización que utilice diferentes combinaciones de tiempo y temperatura para conseguir un efecto equivalente.

A nivel industrial, estos valores se encuentran alrededor de 15-30 segundos a 72-85°C.

Inmediatamente después del calentamiento, debe enfriarse hasta una temperatura de 4-6 °C, ya que no se busca la destrucción total de los gérmenes. (Avellaneda Bargués et al., 2005)

5.3. Sistemas de calentamiento

Si se atiende a la forma en que se realiza el proceso de calentamiento, se puede distinguir entre calentamiento directo e indirecto.

1) Sistemas de calentamiento directo.

La leche se pone en contacto con un fluido que está a una temperatura alta (vapor de agua). La leche entrará a 70-80 °C y entra en contacto con el vapor de agua 4 segundo a 150 °C. A continuación, la leche pasa a una campana de vacío, eliminando el agua añadida durante la esterilización, disminuyendo así la temperatura de la leche hasta los 80 °C aproximadamente.

Los sistemas de esterilización UHT utilizan sistemas directos y éstos pueden ser de dos tipos:

- Sistemas de inyección: En este sistema se inyecta directamente vapor en el producto a tratar térmicamente. El contacto directo asegura mejor las condiciones de calidad del producto respecto a los sistemas de contacto indirecto. Estos equipos son más caros que los de sistema indirecto, ya que tienen un bajo porcentaje de recuperación de calor y un alto coste

operacional. Se usan principalmente para productos de baja viscosidad y requiere un vapor de alta calidad.

- Sistemas de infusión: Aquí, el producto se precalienta a una temperatura de 75°C y luego se introduce en una atmósfera de vapor a través de varios inyectores en una cámara presurizada. El producto pasa después a una cámara de enfriamiento antes de ser sometido a una homogeneización aséptica y finalmente ser enfriado hasta la temperatura de envasado. Es un sistema con el que se obtiene una calidad final superior.

2) Sistemas de calentamiento indirecto.

En este caso, el fluido que está a una alta temperatura (agua caliente) no entra en contacto con la leche. En estos procesos se utilizan intercambiadores de placas o tubulares.

La ventaja de utilizar este sistema es que permiten obtener una elevada recuperación del calor (80-90%). Sin embargo, se puede dañar el producto por sobrecalentamientos y es complicado limpiar este tipo de intercambiadores debido a los depósitos de suciedad.

Generalmente, para la leche pasteurizada se utiliza sistemas de calentamiento indirecto. (Avellaneda Bargués et al., 2005).

5.4. Elección de intercambiador.

Para llevar a cabo el proceso de pasteurización se ha seleccionado un intercambiador de placas, por los siguientes motivos:

- a) Estos intercambiadores poseen una sección regenerativa, que permiten calentar la leche de entrada a la vez que enfría la que sale, lo que supone un ahorro energético del 50-70%.
- b) Coste inicial es bajo.
- c) Las placas son muy flexibles permitiendo modificar los equipos añadiendo o quitando placas.
- d) Para la misma aplicación, el tamaño de un intercambiador tubular es muy superior a uno de placas.
- e) El fácil acceso a las placas hace que su limpieza sea sencilla. Además, las superficies de intercambio tienen pocos problemas de ensuciamiento, resultado de una buena distribución de producto.
- f) El mantenimiento también es muy fácil, se puede limpiar sin desmontar utilizando el sistema "Cleaning-in-place".

Sin embargo, el principal inconveniente del intercambiador de calor es que presenta elevadas pérdidas de carga, lo que hace que se necesiten bombas de alta presión y un alto consumo de energía de bombeo. (González Márquez, 2007).

5.5. Tubo de mantenimiento

El objetivo del tubo de mantenimiento es, como su propio nombre indica, mantener la leche durante una temperatura y tiempo determinado en su interior.

Se trataría de una tubería en forma de zig-zag, aislada térmicamente para evitar fugas de calor al exterior.

Se debe dimensionar para conseguir el tiempo de permanencia, en función del caudal de producto. El caudal de producto es inversamente proporcional al tiempo de permanencia en esta sección. (González Márquez, 2007).

5.6. Etapas posteriores a la pasteurización

Tras la pasteurización, la leche debe ser refrigerada inmediatamente, luego almacenada y envasada y finalmente guardada en una cámara frigorífica.

a) Refrigeración

El proceso que sigue a la pasteurización es la refrigeración. La leche es enfriada para evitar que se estropee por el calor. Se llegan a alcanzar temperaturas menores o iguales a 4°C, aunque la legislación marca que debe ser refrigerada inmediatamente después del tratamiento térmico a una temperatura inferior a los 6°C.

La refrigeración de la leche pasteurizada se realiza en varias etapas, normalmente mediante:

- Leche fría, aún no pasteurizada.
- Salmueras, agua helada u otros agentes refrigerantes.

Para llevar a cabo la refrigeración de la leche, se utilizan normalmente cambiadores de placas (sistema indirecto y flujo en contracorriente).

b) Almacenamiento

Una vez refrigerada, la leche, es almacenada en tanques, lo que permite controlar su calidad antes de envasarla.

c) Envasado

El envasado se realiza en recipientes herméticos, para evitar que la leche se contamine durante su comercialización. El envase puede ser de vidrio, cartón, polietileno...

d) Almacenamiento refrigerado

Después del envasado y hasta su consumo debe mantenerse debajo de los 6°C, es decir en condiciones de almacenamiento refrigerado. (Avellaneda Bargués et al., 2005).

6. DISEÑO DEL EQUIPO DE PASTEURIZACIÓN

La instalación consta de:

- **Tanque de balance:** Recipiente que se emplea para el almacenamiento de la leche cruda. Suministra de forma continua leche al intercambiador de placas mediante la bomba de leche.
- **Bombas:** Las bombas utilizadas en este proyecto son bombas centrífugas. El líquido entra en la bomba, se dirige al ojo y se le comunica movimiento circular por parte de las aspas, quedando a una presión y velocidad mayor debido a la fuerza centrífuga. Se pueden utilizar para líquidos con baja viscosidad (como es el caso de la leche y el agua), además son económicas en el apartado de operación y mantenimiento y se adaptan adecuadamente a cambios de condiciones de operación. El equipo pasteurizador consta de 3 bombas:
 - **Bomba de leche:** Conectada al tanque y al intercambiador de placas.
 - **Bomba de agua caliente:** Alimenta de agua caliente al intercambiador de placas desde la caldera.
 - **Bomba de agua fría:** Bombea el agua fría hacia el intercambiador de placas.
- **Intercambiador de placas:** Es la parte fundamental del equipo de pasteurización.
 - Sección Regenerativa: La leche fría cruda se calienta gracias al calor que recibe de la leche caliente pasteurizada.
 - Sección de calentamiento: El agua caliente procedente de la caldera calienta la leche procedente de la sección regenerativa y luego esta se mantiene durante un periodo de tiempo en las tuberías de retención. Posee una tubería de recirculación de la leche en caso de no alcanzar la temperatura deseada.
 - Sección de enfriamiento: La leche caliente pasteurizada es enfriada en esta sección mediante agua fría.
- **Caldera:** Calienta el agua procedente de la red para el proceso de pasteurización. (Guaraca Pino & Guaraca Sigüencia, 2019).

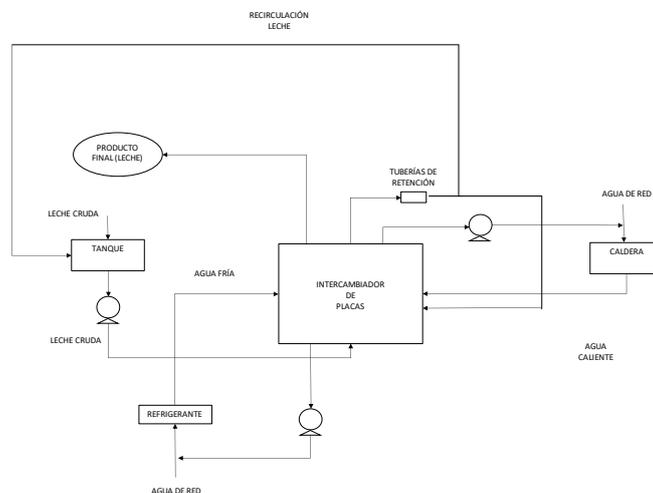


Imagen 1: Diseño del equipo pasteurizador.

7. MODELO MATEMÁTICO

El balance de energía suponiendo que no hay pérdidas térmicas:

$$\Delta H + \Delta Ep + \Delta Ec = Q + We \quad [1]$$

$$\Delta H = Q \quad [2]$$

Para cualquier intercambiador empleado, considerando únicamente las características de entrada y salida de los fluidos, se puede decir que la cantidad de calor ganada por el fluido frío es igual al perdido por el caliente (Despreciando las pérdidas térmicas).

$$Q = mf(h1 - h2) = mc(H2 - H1) = mfCpf(Tfs - Tfe) = mcCpc(Tce - Tcs) \quad [3]$$

- Q: Calor ganado por el fluido frío o perdido por el caliente. (J/h).
- h1-h2: Diferencia de entalpía del fluido frío (J/kg).
- H1-H2: Diferencia de entalpía del fluido caliente (J/kg).
- mf: Caudal másico del fluido frío. (kg/h).
- Cpf: Calor específico del fluido frío (J/kg °C).
- mc: Caudal másico del fluido caliente. (kg/h).
- Cpc: Calor específico del fluido caliente (J/kg °C).
- Tfs: Temperatura de salida del fluido frío. (°C).
- Tfe: Temperatura de entrada del fluido frío. (°C).
- Tce: Temperatura de entrada del fluido caliente. (°C).
- Tcs: Temperatura de salida del fluido caliente. (°C).

Si se aplica la ecuación de Fourier:

$$Q = UA\Delta Tm \quad [4]$$

“Q” se puede calcular con la ecuación 3, mientras la diferencia media de temperaturas (ΔTm) se realizará suponiendo U constante y que los fluidos están en contracorriente. Además, las propiedades de los fluidos se determinarán a la temperatura media entre la entrada y la salida.

Para el cálculo de la diferencia de temperatura efectiva se utilizará la diferencia de temperatura media logarítmica, debido a que la diferencia de estas entre ambos fluidos a lo largo del intercambiador no permanece constante.

$$\Delta Tml = \frac{\Delta T1 - \Delta T2}{\ln \left(\frac{\Delta T1}{\Delta T2} \right)} \quad [5]$$

$$\Delta Tml = \frac{(Tce - Tfs) - (Tcs - Tfe)}{\ln \left(\frac{Tce - Tfs}{Tcs - Tfe} \right)} \quad [6]$$

También, habría que calcular un factor de corrección, F, debido a que la efectividad del intercambiador no es del 100%, ya que los extremos del intercambiador tienen menor superficie de transferencia que el interior.

Para ello, se calculan los valores de capacidad (R) y efectividad (E) y mediante el uso de tablas se puede obtener el valor de F.

$$R = \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{fs} - T_{fe})} \quad [7]$$

$$E = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{fe})} \quad [8]$$

Aunque este cálculo de F solo es necesario si el intercambiador cuenta con menos de 50 placas, para aquellos con más de 50 placas, se puede despreciar y que F tome el valor de 1. (Aguado et al., s.f.).

Cálculo de la pérdida de carga

El cálculo de la pérdida de carga en intercambiadores es fundamental ya que estipula la potencia de las bombas, su consumo... (González Márquez, 2007).

$$\Delta P = 2f \frac{G^2 L}{g D_e \rho} \quad [9]$$

$$f = 2,5 \left(\frac{G D_e}{\mu} \right)^{-0,3} \quad [10]$$

- ΔP : Pérdida de carga. (mca)
- f: Factor f para la pérdida de carga.
- G: $v \cdot \rho$. (kg/m²s)
- L: Altura de la placa. (m)
- g: Gravedad. (m/s²)
- De: Longitud característica del canal. (m)
- ρ : Densidad. (kg/m³)
- μ : Viscosidad. (Pa s)

Cálculo de la longitud del tubo de mantenimiento

La longitud del tubo de mantenimiento depende del caudal de producto y del tiempo que se desea que este permanezca en su interior. Además, es necesario utilizar un factor de eficiencia comprendido entre 0,8-0,9, debido a que las velocidades de las distintas porciones de leche en el interior del tubo serán diferentes.

$$V = \frac{Q T_p}{\gamma} = A * L = \frac{\pi}{4} D^2 L \quad [11]$$

$$L = \frac{V \pi}{4 D^2} \quad [12]$$

- Q: Caudal de leche pasteurizada. (m³/s)
- T_p: Tiempo de mantenimiento. (s)

- Γ : Factor de eficiencia.
- V: Volumen de leche para un Q y T_p dado. (dm^3)
- L: Longitud del tubo de mantenimiento. (m)
- D: Diámetro interno del tubo de mantenimiento. (mm) (Aguado et al., s.f.).

8. CÁLCULOS

8.1. Datos de partida

Caudal de leche	kg/h	5000
b (Distancia entre placas)	mm	4
W (ancho placa)	m	0,427
L (Altura placa)	m	1,2375
a (Superficie de intercambio de 1 placa)	m ²	0,5284125
Espesor	m	0,0006
Conductividad térmica acero inox	W/m°C	13,5
Longitud característica del canal	m	0,008

Figura 7: Datos del intercambiador de calor.

8.2. Sección de calentamiento

- Cálculo del "UA":

En esta sección las propiedades de los fluidos y las temperaturas son las siguientes:

SECCION DE CALENTAMIENTO					
Propiedades	Unidades	Caliente (Agua)	Frío(Leche)		
Densidad media	kg/m ³	978,24	1040		
Calor Especifico entrada	J/kg°C	4198,56	3890		
Calor específico salida	J/kg°C	4189,40	3890		
Calor Especifico Medio	J/kg°C	4193,98	3890		
Conductividad Térmica(Entrada)	W/m°C	6,71E-01	6,02E-01	Conductividad media caliente	Conductividad media fría
Conductividad Térmica (Salida)	W/m°C	6,65E-01	6,11E-01	6,68E-01	6,06E-01
Viscosidad de entrada	Pa s	2,56E-04	7,84E-04	Viscosidad media caliente	Viscosidad media fría
Viscosidad de salida	Pa s	3,05E-04	7,25E-04	2,81E-04	7,55E-04
Temperatura entrada	K	363,15	338,15	T media (caliente)	T (media fría)
Temperatura salida	K	354,15	348,15	358,65	343,15

Figura 8: Propiedades de los fluidos y relación de temperaturas. Sección de calentamiento.

De la ecuación [3] solo se desconoce la variable mc:

$$mc = \frac{mfC_{pf}(T_{fs} - T_{fe})}{C_{pc}(T_{ce} - T_{cs})} = \frac{5000 \frac{kg}{h} * 3890 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (75 - 65)^{\circ}C}{4193,98 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (90 - 81)^{\circ}C} = 5153 \frac{kg}{h}$$

Aplicando nuevamente la ecuación [3], obtendríamos el valor del calor.

$$Q = mfC_{pf}(T_{fs} - T_{fe}) = \frac{5000 \frac{kg}{h} * 3890 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (75 - 65)^{\circ}C}{3600 \frac{s}{h} * 1000 \frac{J}{kJ}} = 54,03 \text{ kW}$$

Como último paso para obtener el "UA" de la sección de calentamiento se debe hallar el LMTD. Esto se realiza mediante la ecuación [6].

$$\Delta T_{ml} = \frac{(90 - 75) - (81 - 65)}{\ln\left(\frac{90 - 75}{81 - 65}\right)} = 15,49 \text{ }^{\circ}C$$

Para calcular el factor de corrección se hace uso de la gráfica que se encuentra en el Anexo (**Ver Anexo**) y de la capacidad (R) y la efectividad (E) (Ecuaciones 7 y 8).

$$R = \frac{(90 - 81)}{(75 - 65)} = 0,9$$

$$E = \frac{(75 - 65)}{(90 - 65)} = 0,4$$

Llevando estos valores a la gráfica se obtiene un factor de corrección Ft= 0,934.

$$\Delta T m l_{\text{corregido}} = 15,49 \text{ }^{\circ}\text{C} * 0,934 = 14,47 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad [6]$$

A continuación, mediante la ecuación [4] se puede obtener el "UA".

$$UA = \frac{Q}{\Delta T m l_{\text{corregido}}} = \frac{54,03 \text{ kW}}{14,47 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 3733,27 \frac{\text{W}}{\text{ }^{\circ}\text{C}} \quad [4]$$

- **Cálculo de la pérdida de carga:**

Para el cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador se hará uso de las ecuaciones [16] y [17]. Para emplearlas, primero habrá que calcular las velocidades del fluido caliente y frío.

$$v \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\frac{\text{Caudal} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{3600}}{\frac{\text{Distancia entre placas (mm)}}{1000} * \text{Ancho de placa (m)} * \text{Densidad} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

$$v_{\text{frío}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\frac{5000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{3600}}{\frac{4 \text{ (mm)}}{1000} * 0,427 \text{ (m)} * 1040 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 0,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{caliente}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\frac{5153 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{3600}}{\frac{4 \text{ (mm)}}{1000} * 0,427 \text{ (m)} * 978,24 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 0,86 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se calcula el factor "f", mediante la ecuación [17]:

$$f(\text{frío}) = 2,5 \left(\frac{GD_e}{\mu} \right)^{-0,3} = 2,5 \left(\frac{0,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,008 \text{ m}}{7,55 * 10^{-4} \text{ Pa s}} \right)^{-0,3} = 1,65 * 10^{-1}$$

$$f(\text{caliente}) = 2,5 \left(\frac{GD_e}{\mu} \right)^{-0,3} = 2,5 \left(\frac{0,86 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 978,24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,008 \text{ m}}{2,81 * 10^{-4} \text{ Pa s}} \right)^{-0,3} = 1,21 * 10^{-1}$$

Finalmente, mediante la ecuación [16] se procede a calcular la pérdida de carga:

$$\Delta P = 2f \frac{G^2 L}{g D_e \rho}$$

$$\Delta P (frio) = 2 * 1,65 * 10^{-1} * \frac{\left(0,78 \frac{m}{s} * 1040 \frac{kg}{m^3}\right)^2 * 1,2375m}{9,8 \frac{m}{s^2} * 1040 \frac{kg}{m^3} * 0.008 m} * \frac{0.0000981 bar}{1 \frac{kg}{m^2}}$$

$$= 0,325 bar$$

$$\Delta P (caliente) = 2 * 1,65 * 10^{-1} * \frac{\left(0,86 \frac{m}{s} * 978,24 \frac{kg}{m^3}\right)^2 * 1,2375m}{9,8 \frac{m}{s^2} * 978,24 \frac{kg}{m^3} * 0.008 m} * \frac{0.0000981 bar}{1 \frac{kg}{m^2}}$$

$$= 0,270 bar$$

8.3. Sección regenerativa

- Cálculo del "UA":

En esta sección las propiedades de los fluidos y las temperaturas son las siguientes:

SECCION REGENERATIVA					
Propiedades	Unidades	Caliente (Leche Pasteurizada Caliente)	Frío (Leche Cruda)		
Densidad media	kg/m3	1040	1040		
Calor Especifico entrada	J/kg°C	3890	3890		
Calor específico salida	J/kg°C	3890	3890		
Calor Especifico Medio	J/kg°C	3890	3890		
Conductividad Térmica (Entrada)	W/m°C	6,11E-01	5,24E-01	Conductividad media caliente	Conductividad media fría
Conductividad Térmica (Salida)	W/m°C	5,39E-01	6,02E-01	5,75E-01	5,63E-01
Viscoidad de entrada	Pa s	7,25E-04	2,95E-03	Viscoidad media caliente	Viscoidad media fría
Viscoidad de salida	Pa s	2,38E-03	7,84E-04	1,55E-03	1,87E-03
Temperatura entrada	K	348,15	277,18	T media (caliente)	T (media fría)
Temperatura salida	K	287,18	338,15	317,6625	307,6625

Figura 9: Propiedades de los fluidos y relación de temperaturas. Sección regenerativa.

De la ecuación [3] solo se desconoce la variable mc:

$$mc = \frac{mfC_{pf}(T_{fs} - T_{fe})}{C_{pc}(T_{ce} - T_{cs})} = \frac{5000 \frac{kg}{h} * 3890 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (75 - 14,025)^{\circ}C}{3890 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (65 - 4,025)^{\circ}C} = 5000 \frac{kg}{h}$$

Aplicando nuevamente la ecuación [3], obtendríamos el valor del calor.

$$Q = mfC_{pf}(T_{fs} - T_{fe}) = \frac{5000 \frac{kg}{h} * 3890 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (65 - 4,025)^{\circ}C}{3600 \frac{s}{h} * 1000 \frac{J}{kJ}} = 329,07 kW$$

Como último paso para obtener el "UA" de la sección de calentamiento se debe hallar el LMTD. Esto se realiza mediante la ecuación [6].

$$\Delta T_{ml} = \frac{(75 - 65) - (14,025 - 4,025)}{\ln\left(\frac{(75 - 65)}{(14,025 - 4,025)}\right)} = \frac{0}{0}^{\circ}C$$

En este caso, da lugar a una indeterminación, por tanto, el LMTD será una de las dos diferencias de temperaturas. LMTD= 10 °C.

Para calcular el factor de corrección se hace uso de la gráfica que se encuentra en el Anexo (**Ver Anexo**) y de la capacidad (R) y la efectividad (E) (Ecuaciones 7 y 8)

$$R = \frac{(75 - 14,025)}{(65 - 4,059)} = 1$$

$$E = \frac{(65 - 4,025)}{(75 - 4,025)} = 0,86$$

Llevando estos valores a la gráfica se observa que no coincide con ninguna curva. Esto significa que el factor de corrección es muy bajo y, por tanto, se toma como valor "Ft" = 1, que se tendrá en cuenta posteriormente en la simulación.

A continuación, mediante la ecuación [4] se puede obtener el "UA".

$$UA = \frac{Q}{\Delta T_{ml_{corregido}}} = \frac{329,4 kW}{10^{\circ}C} = 32940 \frac{W}{^{\circ}C} [4]$$

- Cálculo de la pérdida de carga:

Para el cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador se hará uso de las ecuaciones [16] y [17]. Para emplearlas, primero habrá que calcular las velocidades del fluido caliente y frío.

$$v \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\frac{\text{Caudal} \left(\frac{kg}{h} \right)}{3600}}{\frac{\text{Distancia entre placas (mm)}}{1000} * \text{Ancho de placa (m)} * \text{Densidad} \left(\frac{kg}{m^3} \right)}$$

$$v \text{ frío} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\frac{5000 \left(\frac{kg}{h} \right)}{3600}}{\frac{4 \text{ (mm)}}{1000} * 0,427 \text{ (m)} * 1040 \left(\frac{kg}{m^3} \right)} = 0,78 \frac{m}{s}$$

$$v \text{ caliente} \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{\frac{5153 \left(\frac{kg}{h} \right)}{3600}}{\frac{4 \text{ (mm)}}{1000} * 0,427 \text{ (m)} * 1040 \left(\frac{kg}{m^3} \right)} = 0,78 \frac{m}{s}$$

Se calcula el factor "f", mediante la ecuación [17]:

$$f(\text{frío}) = 2,5 \left(\frac{GD_e}{\mu} \right)^{-0.3} = 2,5 \left(\frac{0,78 \frac{m}{s} * 1040 \frac{kg}{m^3} * 0,008 \text{ m}}{1,87 * 10^{-3} \text{ Pa s}} \right)^{-0.3} = 2,16 * 10^{-1}$$

$$f(\text{caliente}) = 2,5 \left(\frac{GD_e}{\mu} \right)^{-0.3} = 2,5 \left(\frac{0,78 \frac{m}{s} * 1040 \frac{kg}{m^3} * 0,008 \text{ m}}{1,55 * 10^{-3} \text{ Pa s}} \right)^{-0.3} = 2,05 * 10^{-1}$$

Finalmente, mediante la ecuación [16] se procede a calcular la pérdida de carga:

$$\Delta P = 2f \frac{G^2 L}{g D_e \rho}$$

$$\Delta P (\text{frío}) = 2 * 2,16 * 10^{-1} * \frac{\left(0,78 \frac{m}{s} * 1040 \frac{kg}{m^3} \right)^2 * 1,2375 \text{ m}}{9,8 \frac{m}{s^2} * 1040 \frac{kg}{m^3} * 0,008 \text{ m}} * \frac{0,0000981 \text{ bar}}{1 \frac{kg}{m^2}}$$

$$= 0,426 \text{ bar}$$

$$\Delta P (\text{caliente}) = 2 * 2,05 * 10^{-1} * \frac{\left(0,78 \frac{m}{s} * 1040 \frac{kg}{m^3} \right)^2 * 1,2375 \text{ m}}{9,8 \frac{m}{s^2} * 1040 \frac{kg}{m^3} * 0,008 \text{ m}} * \frac{0,0000981 \text{ bar}}{1 \frac{kg}{m^2}}$$

$$= 0,403 \text{ bar}$$

8.4. Sección de enfriamiento

- **Cálculo del “UA”:**

En esta sección las propiedades de los fluidos y las temperaturas son las siguientes:

SECCION DE ENFRIAMIENTO					
Propiedades	Unidades	Frío(Agua)	Caliente(Leche)		
Densidad media	kg/m ³	1000,17	1040		
Calor Especifico entrada	J/kg ^o C	4219,36	3890		
Calor específico salida	J/kg ^o C	4202,70	3890		
Calor Especifico Medio	J/kg ^o C	4211,03	3890		
Conductividad Térmica(Entrada)	W/m ^o C	5,71E-01	5,39E-01	Conductividad media caliente	Conductividad media fria
Conductividad Térmica (Salida)	W/m ^o C	5,83E-01	5,24E-01	5,77E-01	5,31E-01
Viscosidad de entrada	Pa s	1,60E-03	2,38E-03	Viscosidad media caliente	Viscosidad media fria
Viscosidad de salida	Pa s	1,39E-03	2,95E-03	1,49E-03	2,67E-03
Temperatura entrada	K	275,15	287,175	T media (caliente)	T (media fria)
Temperatura salida	K	282,70	277,15	278,924	282,1625

Figura 10: Propiedades de los fluidos y relación de temperaturas. Sección de enfriamiento.

De la ecuación [3] solo se desconoce la variable mf:

$$mf = \frac{mcC_{pc}(T_{ce} - T_{cs})}{C_{pf}(T_{fs} - T_{fe})} = \frac{5000 \frac{kg}{h} * 3890 \frac{J}{kg^oC} * (14,03 - 4)^oC}{4211,71 \frac{J}{kg^oC} * (9,55 - 2)^oC} = 6135 \frac{kg}{h}$$

Aplicando nuevamente la ecuación [3], obtendríamos el valor del calor.

$$Q = mfC_{pf}(T_{fs} - T_{fe}) = \frac{5000 \frac{kg}{h} * 3890 \frac{J}{kg^oC} * (14,03 - 4)^oC}{3600 \frac{s}{h} * 1000 \frac{J}{kJ}} = 54,16 kW$$

Como último paso para obtener el “UA” de la sección de calentamiento se debe hallar el LMTD. Esto se realiza mediante la ecuación [6].

$$\Delta T_{ml} = \frac{(14,03 - 9,55) - (4 - 2)}{\ln\left(\frac{(14,03 - 9,55)}{4 - 2}\right)} = 3,07^oC$$

Para calcular el factor de corrección se hace uso de la gráfica que se encuentra en el Anexo (**Ver Anexo**) y de la capacidad (R) y la efectividad (E) (Ecuaciones 7 y 8)

$$R = \frac{(14,03 - 4)}{(9,55 - 2)} = 1,47$$

$$E = \frac{(9,55 - 2)}{(14,03 - 2)} = 0,57$$

Llevando estos valores a la gráfica se observa que no coincide con ninguna curva. Al igual que en la sección regenerativa, significa que el factor de corrección es muy bajo y, por tanto, se toma como valor "Ft" = 1, que se tendrá en cuenta posteriormente en la simulación.

A continuación, mediante la ecuación [4] se puede obtener el "UA".

$$UA = \frac{Q}{\Delta T m l_{\text{corregido}}} = \frac{54,16 \text{ kW}}{3,07 \text{ }^{\circ}\text{C}} = 17600 \frac{\text{W}}{\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{ [4]}$$

- **Cálculo de la pérdida de carga:**

Para el cálculo de la pérdida de carga en el intercambiador se hará uso de las ecuaciones [16] y [17]. Para emplearlas, primero habrá que calcular las velocidades del fluido caliente y frío.

$$v \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\frac{\text{Caudal} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{3600}}{\frac{\text{Distancia entre placas (mm)}}{1000} * \text{Ancho de placa (m)} * \text{Densidad} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

$$v_{\text{caliente}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\frac{5000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{3600}}{\frac{4 \text{ (mm)}}{1000} * 0,427 \text{ (m)} * 1040 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 0,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{frío}} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{\frac{6135 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{3600}}{\frac{4 \text{ (mm)}}{1000} * 0,427 \text{ (m)} * 1000,17 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 1,00 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Se calcula el factor "f", mediante la ecuación [17]:

$$f(\text{caliente}) = 2,5 \left(\frac{GD_e}{\mu} \right)^{-0,3} = 2,5 \left(\frac{0,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,008 \text{ m}}{2,67 * 10^{-3} \text{ Pa s}} \right)^{-0,3} = 2,41 * 10^{-1}$$

$$f(\text{frío}) = 2,5 \left(\frac{GD_e}{\mu} \right)^{-0,3} = 2,5 \left(\frac{1,10 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1000,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,008 \text{ m}}{1,49 * 10^{-3} \text{ Pa s}} \right)^{-0,3} = 1,90 * 10^{-1}$$

Finalmente, mediante la ecuación [16] se procede a calcular la pérdida de carga:

$$\Delta P = 2f \frac{G^2 L}{g D_e \rho}$$

$$\Delta P (\text{caliente}) = 2 * 2,41 * 10^{-1} * \frac{\left(0,78 \frac{m}{s} * 1040 \frac{kg}{m^3}\right)^2 * 1,2375m}{9,8 \frac{m}{s^2} * 1040 \frac{kg}{m^3} * 0,008 m} * \frac{0,0000981 \text{ bar}}{1 \frac{kg}{m^2}}$$

$$= 0,474 \text{ bar}$$

$$\Delta P (\text{frío}) = 2 * 1,90 * 10^{-1} * \frac{\left(1,1 \frac{m}{s} * 1000,17 \frac{kg}{m^3}\right)^2 * 1,2375m}{9,8 \frac{m}{s^2} * 1000,17 \frac{kg}{m^3} * 0,008 m} * \frac{0,0000981 \text{ bar}}{1 \frac{kg}{m^2}}$$

$$= 0,587 \text{ bar}$$

8.5. Tubo de mantenimiento

La longitud del tubo de retención se calcula de tal forma, que el producto (en este caso, leche) se mantenga en su interior durante el tiempo estipulado por la ley (15 segundos).

Haciendo uso de las ecuaciones [11] y [12], se podrá llevar a cabo su cálculo.

Primero se calcula el volumen de leche en el interior de la tubería:

$$V (dm^3) = \frac{Q \left(\frac{l}{s}\right) T_p (s)}{\gamma} = A (dm^2) * L (dm) = \frac{\pi}{4} D (dm)^2 L (dm)$$

$$V (dm^3) = \frac{\frac{5000 \left(\frac{kg}{h}\right)}{1040 \left(\frac{kg}{m^3}\right) * 3600 \left(\frac{s}{h}\right)} * 1000 \left(\frac{l}{m^3}\right) * 15 (s)}{0,85} = 23,57 dm^3$$

Ahora se debe calcular el diámetro interior de la tubería:

$$A (m^2) = \frac{Q \left(\frac{m^3}{s}\right)}{v \left(\frac{m}{s}\right)} = \frac{\pi}{4} D^2 (dm)^2$$

$$A(m^2) = \frac{5000 \left(\frac{kg}{h}\right)}{1040 \left(\frac{kg}{m^3}\right) * 3600 \left(\frac{s}{h}\right)} = 1,71 \times 10^{-3} m^2$$

$$D(m) = \sqrt{\frac{4}{\pi} * 1,71 \times 10^{-3} (m^2)} = 0,047 m$$

$$D(mm) = 46,63 mm$$

A continuación, mediante la siguiente tabla se puede ver cuál es el diámetro más apropiado. (En este caso el de 51,4 mm de diámetro interno).

***NOTA: La siguiente tabla corresponde a tuberías para agua caliente sanitaria, ya que en la bibliografía no se ha encontrado tablas de tubos de mantenimiento para leche pasteurizada. Estas tuberías no se pueden utilizar en la instalación (debido a las temperaturas que se emplean) sin embargo, sirven de guía en el caso de los diámetros.**

Serie	Art.-No.	Diámetro d (mm)	Espesor de pared s (mm)	Diámetro interior di (mm)	Capacidad [l/m]	Peso [kg]	DN	ml Paquete (m)	
5	Soldadura a enchufe								
	10208	20	1,9	16,2	0,206	0,109	15	100	
	10210	25	2,3	20,4	0,327	0,165	20	100	
	10212	32	2,9	26,2	0,539	0,265	25	40	
	10214	40	3,7	32,6	0,834	0,415	32	40	
	10216	50	4,6	40,8	1,307	0,645	40	20	
	10218	63	5,8	51,4	2,074	1,015	50	20	
	10220	75	6,8	61,4	2,959	1,415	65	20	
	10222	90	8,2	73,6	4,252	2,045	80	12	
	10224	110	10,0	90,0	6,359	3,136	-	8	
	10226	125	11,4	102,2	8,199	3,927	100	4	
	10308*	20	1,9	16,2	0,206	0,109	15	100	
	10310*	25	2,3	20,4	0,327	0,158	20	100	
	10312*	32	2,9	26,2	0,539	0,257	25	50	
	Soldadura a tope								
	10230	160	14,6	130,8	13,430	6,416	125	5,8	
	10234	200	18,2	163,6	21,010	9,991	150	5,8	
	10238	250	22,7	204,6	32,861	15,540	200	5,8	
	10242	315	28,6	257,8	52,172	25,700	250	5,8	
	10244	355	32,2	290,6	66,325	31,300	300	5,8	
10246	400	36,3	327,6	84,290	41,400	300	5,8		
10248	450	40,9	368,2	106,477	52,400	400	5,8		

Figura 11: Diámetros de tuberías. Reproducido de Aquatherm, s.f., Recuperado de <http://aquatherm.es/wp-content/uploads/FT-aquatherm-green-pipe-SDR51.pdf>. Copyright s.f. por aquatherm. Reproducido con permiso.

Ahora sí, se procedería a calcular la longitud del tubo de mantenimiento:

$$L (dm) = \frac{V(dm^3)\pi}{4D(dm)^2} = \frac{23,57(dm^3)\pi}{40,514(dm)^2} = 113,58 dm$$

$$L (m) = 11,358 m$$

8.6. Diámetro de las conducciones

Para las tuberías que transportan la leche y el agua (fría y caliente) se realiza el mismo cálculo anterior. Todas las tuberías tienen el mismo tamaño, debido que las relaciones Caudal/Velocidad de cada una dan el mismo resultado. Por tanto, todas las tuberías serán de 2".

9. SIMULACIÓN

9.1. Inicio y creación del componente "leche"

Se abre un nuevo caso en UniSim Design, y se añade el componente agua.

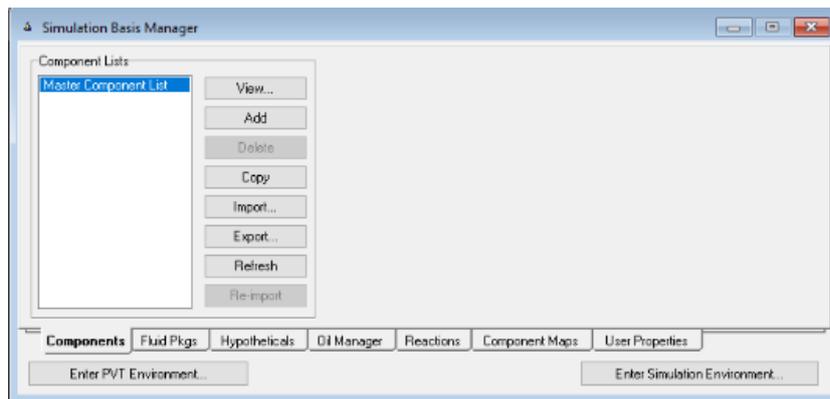


Imagen 2: Simulation Basis Manager.

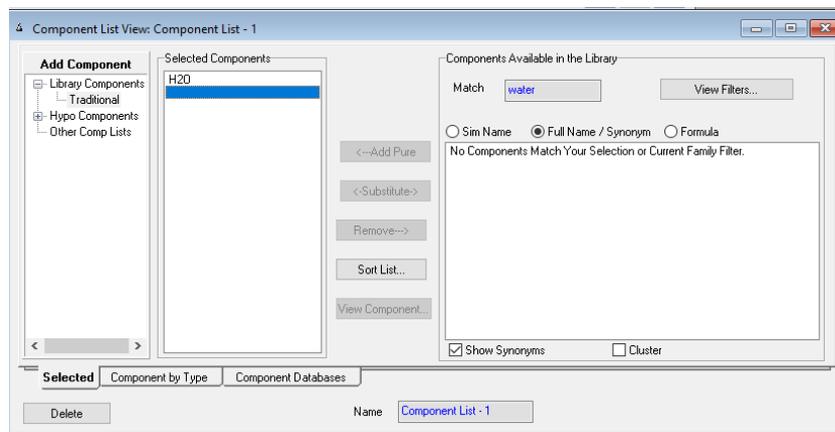


Imagen 3: Component List.

También, se tiene que añadir la leche. Sin embargo, esta no se encuentra en la librería por lo que habría que crearla. Para ello, hay que dirigirse a “Hypo Components” y seleccionar “Quick Create a Hypo Component”.

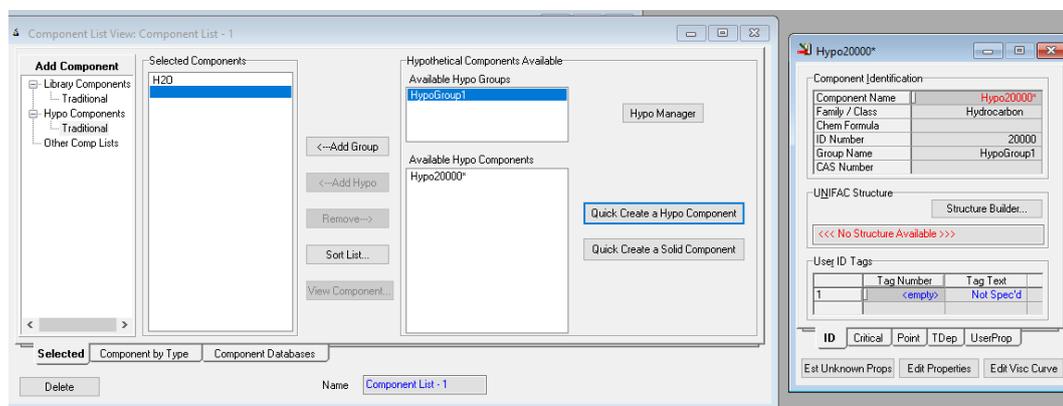


Imagen 4: Hypo Component.

Ahora en la pestaña que se abre, se pulsa “Structure Builder” y se añade el grupo del agua (Se realiza así, porque la leche es muy similar al agua y cambiándole ciertas propiedades se podría simular correctamente). Se cierra esta pestaña y se le cambia el nombre al componente.

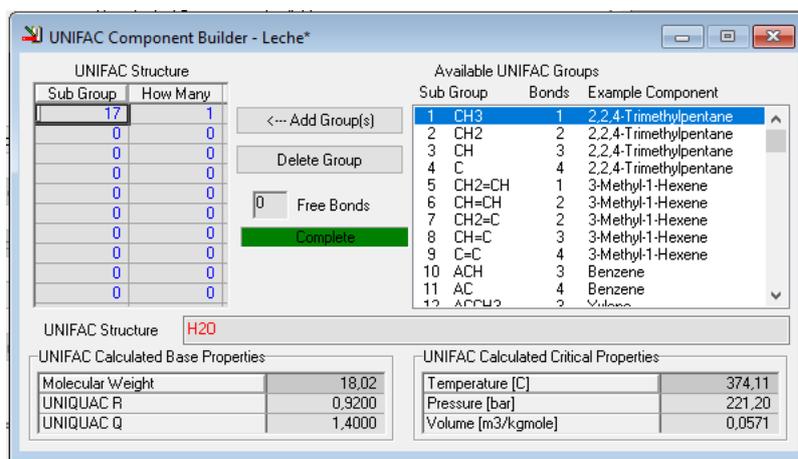


Imagen 5: Component Builder - Leche.

Hay que añadirle las propiedades al componente, esto se realiza seleccionando “Est Unknown Props”. Posteriormente, entrando en “Hypo Manager” y “View Group” se cambia la clase de componente que es la leche, de “Hydrocarbon” a “Miscellaneous” (Igual que el agua). Así se tendría creado el componente “leche”, pero con las mismas propiedades que el agua. Posteriormente, se añadiría a la lista junto al agua.

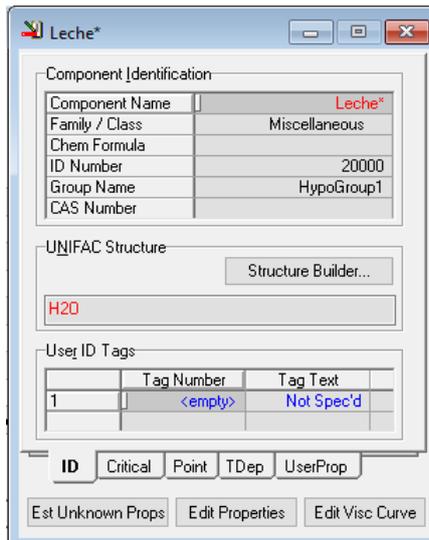


Imagen 6: Componente Leche.

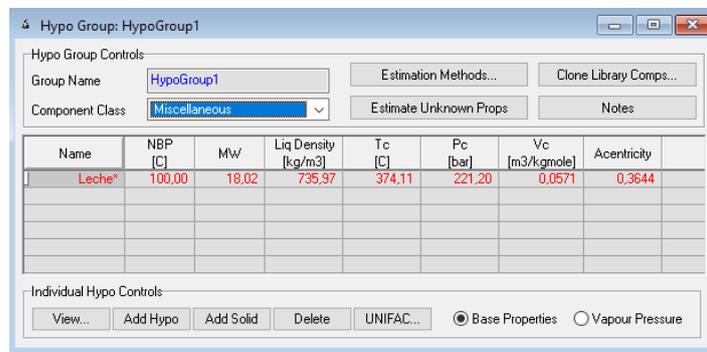


Imagen 7: Componente Leche Hypogroup.

Ahora, se procede a cambiar algunas propiedades de la leche que aparecen en el apartado de propiedades fisicoquímicas de la leche. (**Ver Propiedades fisicoquímicas de la leche**). (Exclusivamente se modifica el punto de ebullición y la densidad estándar, el resto se realizará más adelante).

9.2. Elección del paquete de propiedades

Se entra en “Fluid pkgs”, para seleccionar el paquete de propiedades a utilizar. No se puede incluir a la pasteurización dentro de ninguno de ellos, ya que no se trata de una aplicación petroquímica, y el UniSim Design se utiliza mayoritariamente para la simulación de estas. Tampoco se pueden utilizar los paquetes “ASME Steam” y “NBS Steam” que se encuentran dentro de “Miscellaneous Types”, (Paquetes que son únicos y no encajan en el resto), debido a que solo se pueden utilizar para el agua y reconoce a la leche como otro componente, aunque sea prácticamente idéntica al agua. Sin embargo, el paquete “Peng-Robinson” es generalmente recomendado. Las mejoras a esta ecuación de estado permiten que sea precisa para una

variedad de sistemas en una amplia gama de condiciones. Resuelve rigurosamente la mayoría de los sistemas monofásicos, bifásicos y trifásicos con un alto grado de eficiencia y fiabilidad.

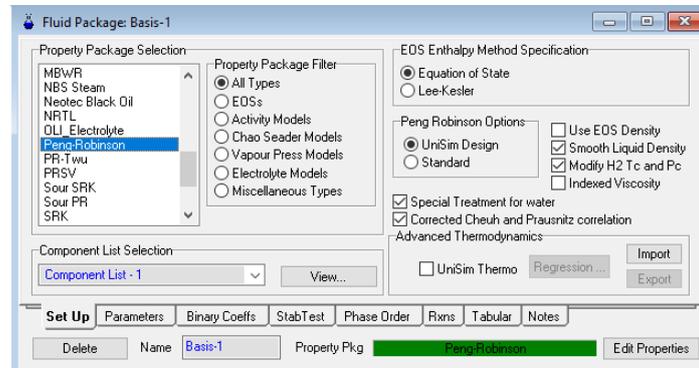


Imagen 8: Fluid Package.

9.3. Obtención de las propiedades de los componentes

Una vez seleccionado el paquete, se necesitará saber el calor específico de los componentes, ya que es la base del intercambio de calor, y es el dato prioritario para realizar los cálculos. Esto se realiza, pulsando dos veces en el paquete de propiedades seleccionado y dirigiéndose a la pestaña “Tabular”. Se seleccionan los cuadros que se muestran a continuación.

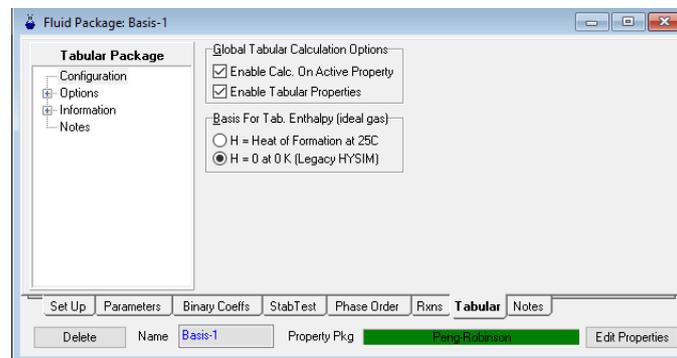


Imagen 9: Fluid Package - Tabular.

Se activa “Enable Calc. On Active Property” para que todas las propiedades activas seleccionadas se calculen a través del paquete tabular. Si esta casilla no está activada, todas las propiedades son calculadas por el Paquete de propiedades. Esto proporciona un interruptor maestro para habilitar/deshabilitar el paquete tabular mientras se conservan las propiedades seleccionadas.

Mientras que “Enable Tabular Properties” activa o desactiva las propiedades tabulares. Si la casilla de verificación está desactivada, ninguno de los datos ingresados previamente se almacena.

En este caso, interesa tener ambas casillas activas.

Para obtener las diferentes propiedades de los componentes, habrá que dirigirse a “Options” y seleccionar aquellas que se quieran observar (en el caso del agua) y cambiar (en el caso de la leche).

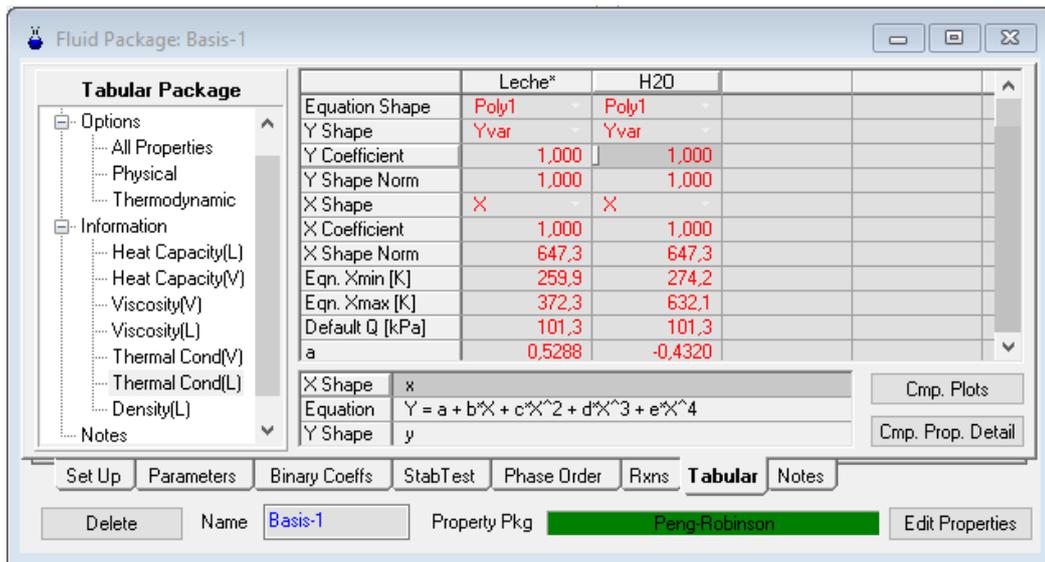


Imagen 10: Tabular Package.

En este caso solo interesan las propiedades que corresponden al estado líquido, sin embargo, se deben seleccionar ambas (líquido y vapor) para que el programa las utilice en la simulación.

Ahora, se realizarán los cambios en las propiedades de la leche (Dirigirse a “Comp. Prop. Detail”), con ayuda del Excel. **(Ver Propiedades fisicoquímicas de la leche).**

VISCOCIDAD LECHE	
a=	3,20429
b=	-0,06431
c=	0,000416667

T(°C)	Visc (cp)
0	3,2043
20	2,0848
40	1,2986
60	0,8457
80	0,7262
100	0,9400
120	1,4871
140	2,3676
160	3,5814
200	7,0090

Figura 12: Viscosidad de la leche en función de la temperatura.

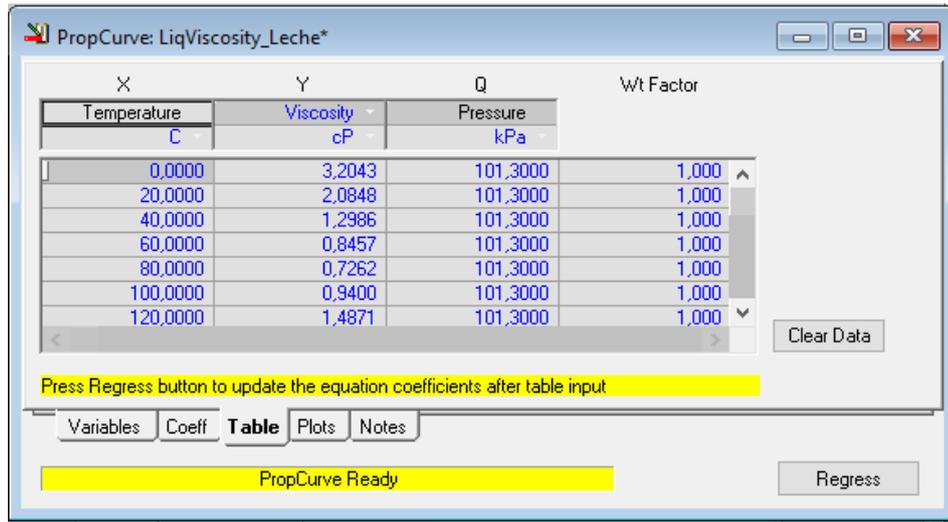


Imagen 11: Viscosidad de la leche.

Y a continuación, pulsar en “Regress”, para que el simulador utilice la curva que se le acaba de proporcionar. Se realiza el mismo procedimiento con la conductividad térmica.

CONDUCTIVIDAD TERMICA LECHE	
a	0,5171
b	0,0016
c	0,0000

T	Cond (W/m°C)
0	0,5171
20	0,5479
40	0,5745
60	0,5968
80	0,6148
100	0,6285
120	0,6380
140	0,6432
160	0,6441
200	0,6332

Figura 13: Conductividad térmica de la leche en función de la temperatura.

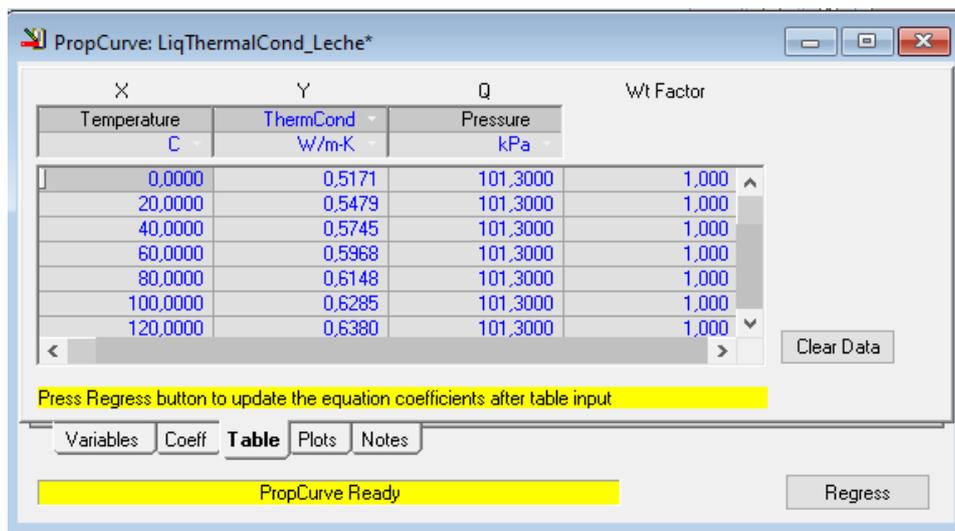


Imagen 12: Conductividad térmica de la leche.

9.4. Metodología seguida para la simulación.

- Estado Estacionario

Mediante el Excel, y utilizando el modelo matemático se han realizado los cálculos para obtener el calor, el UA, las caídas de presión y las temperaturas a utilizar, teniendo en cuenta lo estipulado en la Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector lácteo.

A continuación, se comienza a montar la simulación por la sección de calentamiento y la regenerativa de forma conjunta.

Para la sección de calentamiento, primero se crea la corriente “Agua de red”, especificándole una temperatura de 20°C, una presión cercana a la atmosférica y la composición (en este caso es agua). Al caudal se le puede poner cualquier valor, ya que posteriormente se modificará. Tras esto, se coloca un mixer, al que únicamente estará conectado la corriente anterior y de él saldrá otra, “Agua total”, completamente especificada. Esta última corriente es llevada a un “Heater” (hará la función de caldera), al cual únicamente se le coloca una caída de presión de 0,1 bar, debido a que, en el proceso, este equipo no tiene gran importancia respecto a la caída de presión, pero tampoco su valor es nulo. La corriente saliente, se denomina “Agua a 90”.

Ahora para la sección regenerativa se crea otra corriente (“LECHE_CRUDA”) de 5000 kg/h de caudal másico, a 4°C y 2,238 bar de presión (esta presión es importante para configurar posteriormente el tubo de mantenimiento), y se introduce en un tanque, que se define como “Single Outlet Vessel”. Posteriormente la leche cruda se hará pasar por una bomba para aumentarle la presión hasta los 3 bar llamándose la nueva corriente, “leche a presión”.

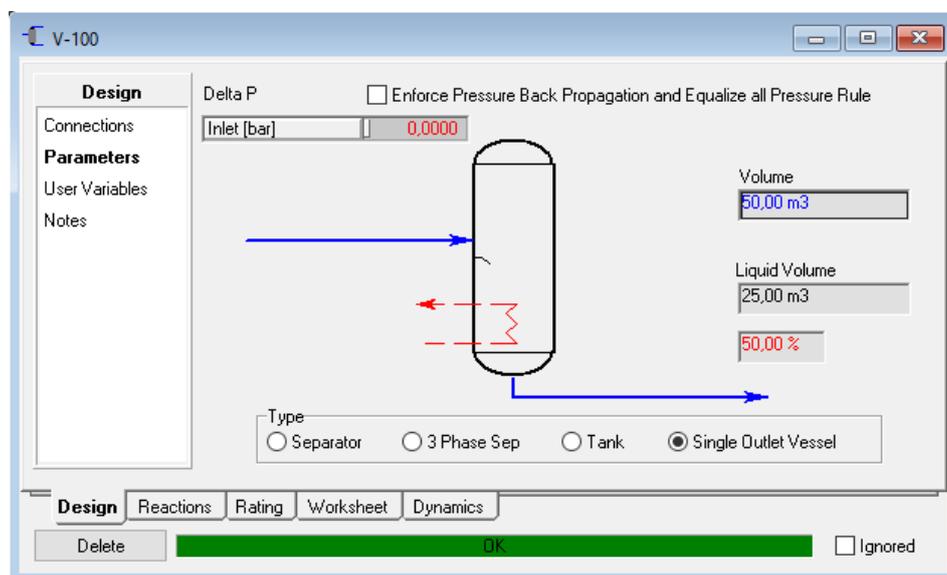


Imagen 13: Tanque de balance en UniSim.

Es ahora cuando se deben colocar 2 intercambiadores de calor, uno para cada sección. Se utilizan intercambiadores de carcasa y tubo de dos pasos por tubo y uno por carcasa en lugar de intercambiadores de placas, tal como establece la bibliografía, debido a que estos últimos no están implementados en el simulador. Sin embargo, en ambos se utilizan las mismas ecuaciones para definirlos por lo que no supone problema alguno. A continuación, se muestran la disposición de las corrientes en ambos intercambiadores, así como sus especificaciones.

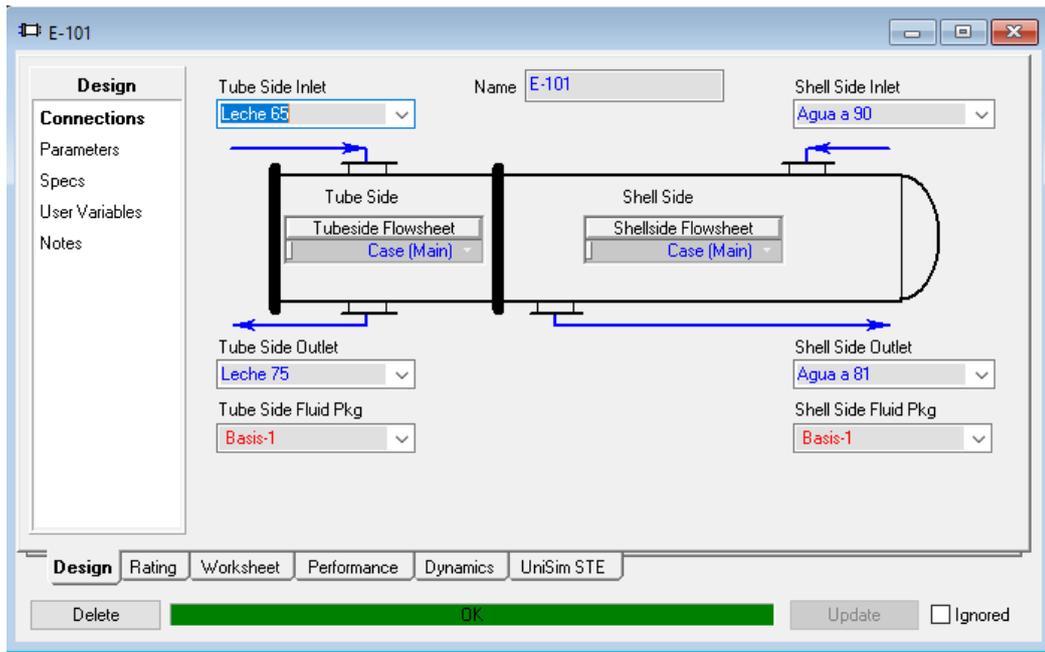


Imagen 14: Intercambiador de calor de la sección de calentamiento. (1).

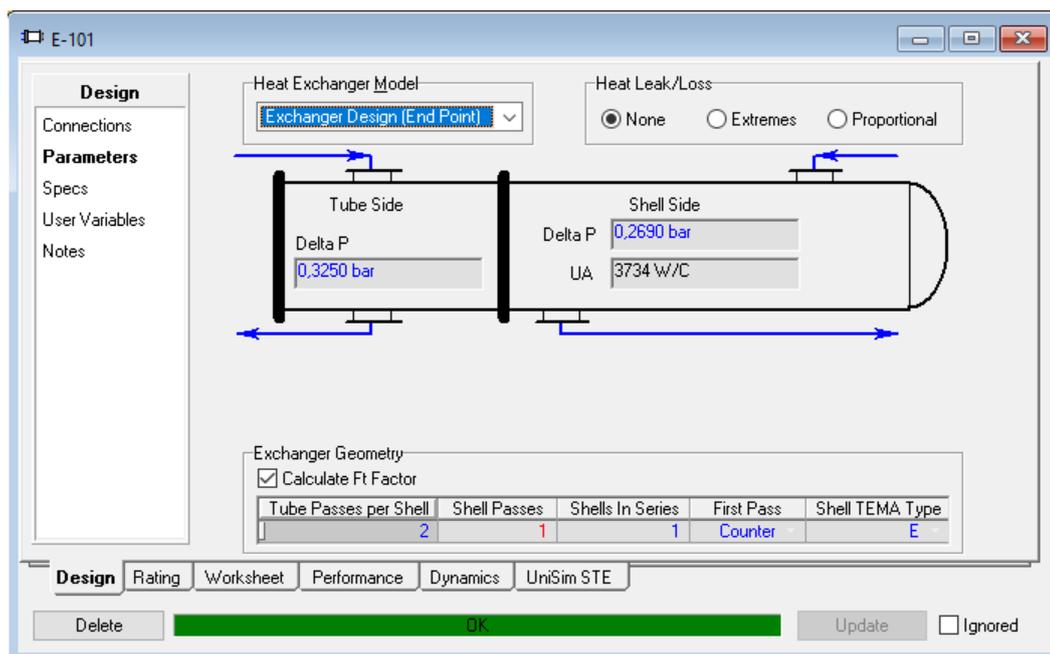


Imagen 15: Intercambiador de calor de la sección de calentamiento. (2).

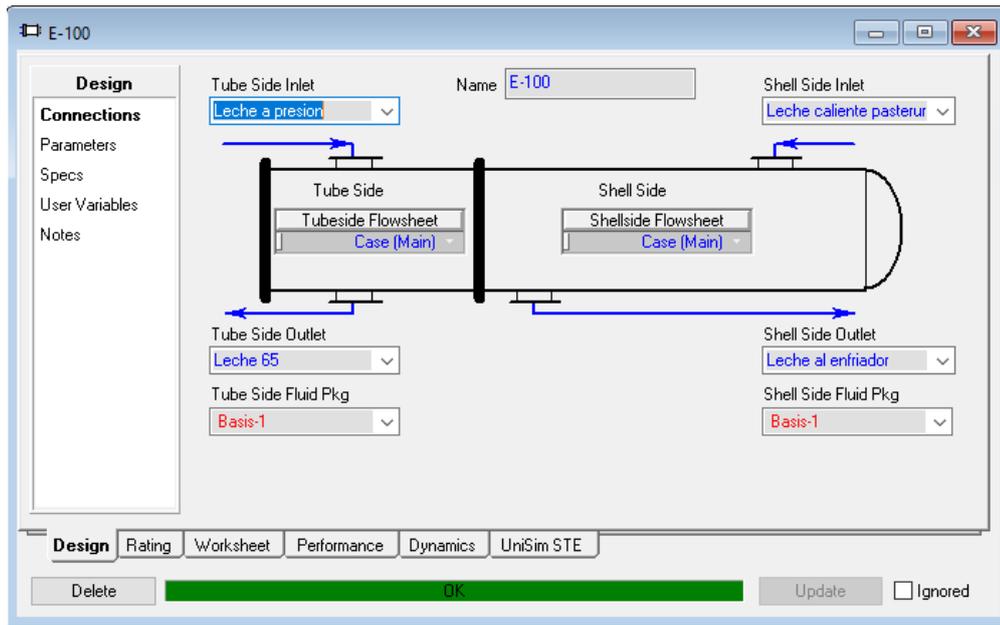


Imagen 16: Intercambiador de calor de la sección regenerativa. (1).

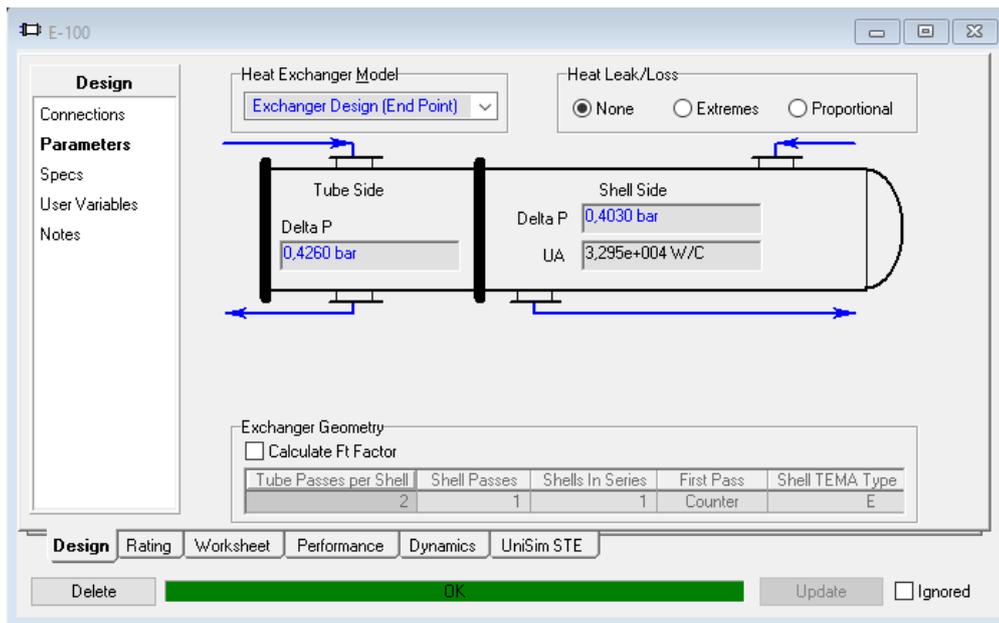


Imagen 17: Intercambiador de calor de la sección regenerativa. (2).

Ambos intercambiadores se definen de la misma forma. Las corrientes frías circulan por los tubos, mientras que las calientes por la carcasa. También se les especifica la caída de presión de ambos lados. La única diferencia es que en el de la sección regenerativa no se ha utilizado el factor de corrección para el LMTD, tal como se ha explicado en los cálculos. Además, se ha utilizado el modelo “Exchanger Design (End Point)” debido a que no hay cambio de fase en las

corrientes y los calores específicos de la leche y el agua son prácticamente constantes (en el caso de la leche lo es). Si los hubiese, se debería usar el “Exchanger Design (Weighted)”.

Seguidamente, se especifican a 65°C y 75 °C las temperaturas de “Leche a 65” y de “Leche 75”, respectivamente. Y después de esta última corriente se coloca una tubería, que hará la función del tubo de mantenimiento, el cual se considerará adiabático debido a que en el proceso de mantenimiento no puede haber cambios sustanciales de temperatura. En la sección de “Rating” se selecciona “Append Segment” y se le especifican las medidas calculadas anteriormente.

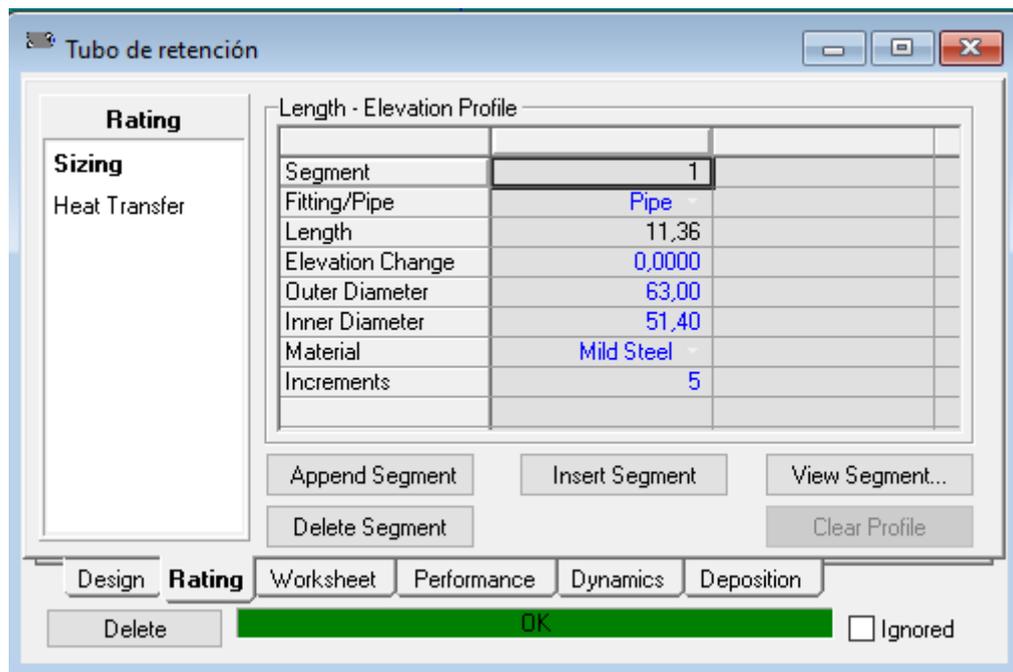


Imagen 18: Tubo de mantenimiento.

Se observa que la longitud viene especificada. Se debe a que después del tubo de mantenimiento, la corriente “Leche_75” se divide en otras dos. Una continúa el proceso (la válvula está abierta), mientras que la otra, “Recirculación leche”, vuelve como leche recirculada al tanque de balance (la válvula está cerrada, por lo que realmente no hay recirculación) que tiene una presión de 2,238 bar. Es esta presión, la que hace que el tubo tenga esa longitud.

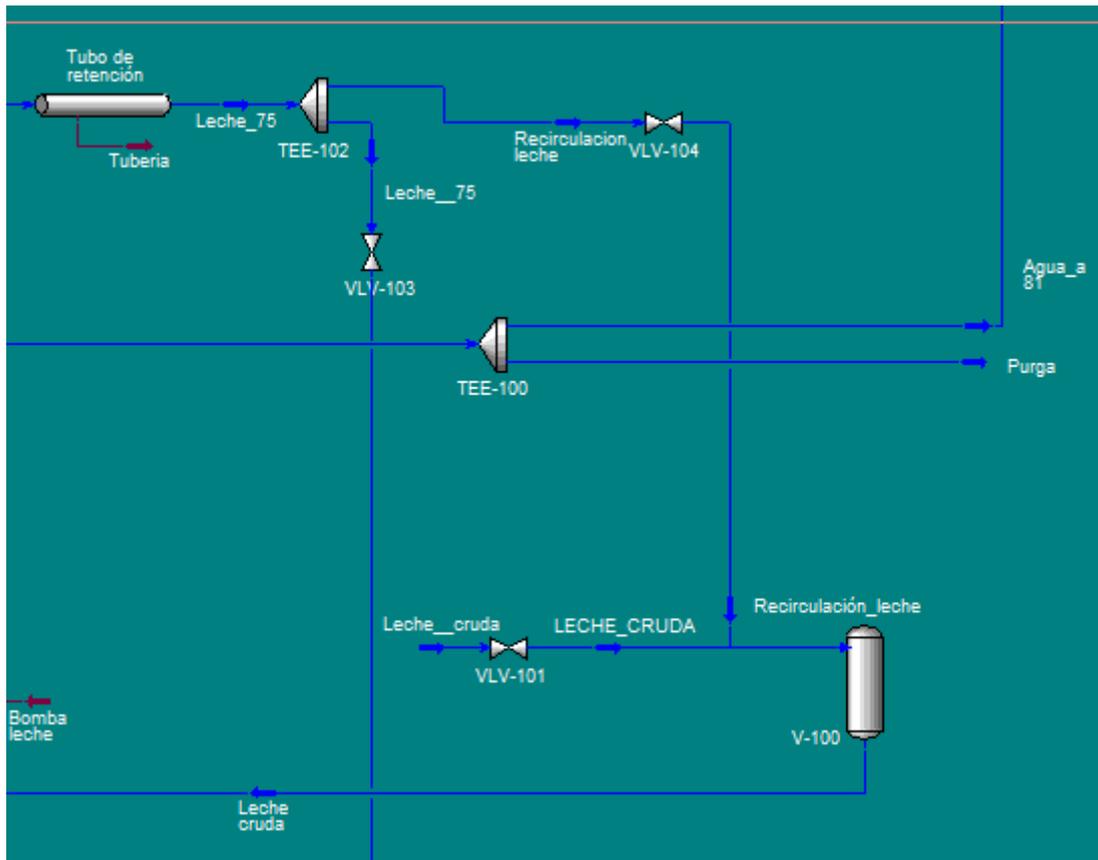


Imagen 19: Distribución de las corrientes tras el tubo de retención.

Por otro lado, la corriente que continúa el proceso, “Leche caliente pasteurizada” está conectada al intercambiador de la sección regenerativa por la carcasa. Con esto, los intercambiadores deben converger, aunque el montaje no ha finalizado.

De vuelta a la sección de calentamiento, se coloca un “Tee” tras la corriente “Agua a 81”, para obtener un grado de libertad y poder colocar la recirculación de agua. La relación de flujo es 0,9999 (el simulador lo toma como 1) para la corriente “Agua_a 81” y el resto para la “Purga”. Luego, “Agua_a 81” se conecta a una bomba (para aumentar su presión y que vuelva el agua a recircular), dando lugar a la corriente “Recirculación 2” que tendrá la misma presión que “Agua de red”, 1,3 bar. Se coloca el conector “Recycle”, sin el cual no se podría realizar la recirculación y de él sale la corriente “Recirculación 1” que se conectará al “mixer” del comienzo. Finalmente, se le especifica un caudal de 35 kg/h a la corriente “Agua de red” y 5110 kg/h a la “Recirculación 1”, además de una presión de 1,3 bar y una temperatura de 81,01 °C. Estos valores de presión y de caudal se han colocado para que el simulador y el Excel coincidan.

La sección de enfriamiento se realiza de la misma manera. El intercambiador de calor se define igual que en la sección regenerativa, el “Cooler” (hace función de refrigerante) tiene

también una caída de presión de 0,1 bar y la relación de flujo en este “Tee” es de 0,9999 para la corriente “4” y el resto para la “Purga 2”. Los caudales para las corrientes “Agua de red 2” (20°C y 1,3 bar) y “Recirc fría” (9,661°C y 1,3 bar) son 50 kg/h y 6750 kg/h, respectivamente.

El “PFD” en estado estacionario queda de la siguiente manera:

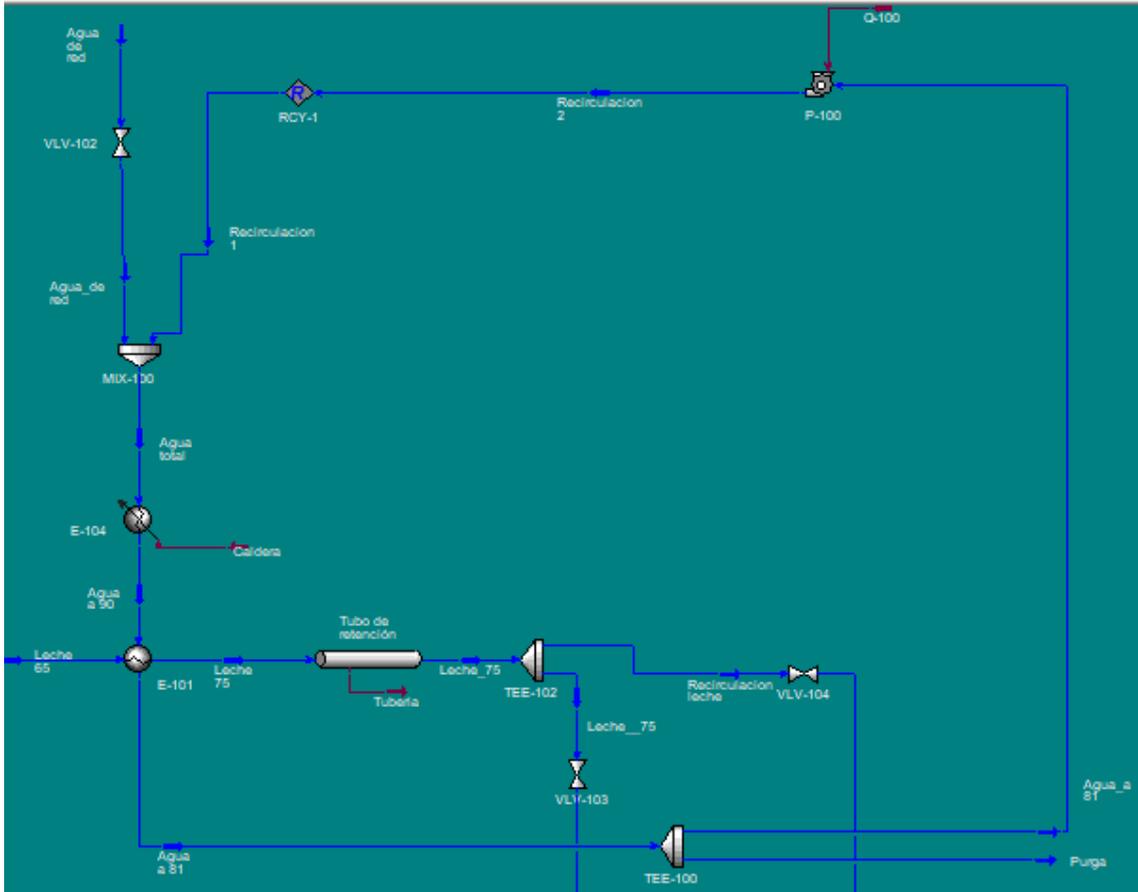


Imagen 20: PFD, sección de calentamiento.

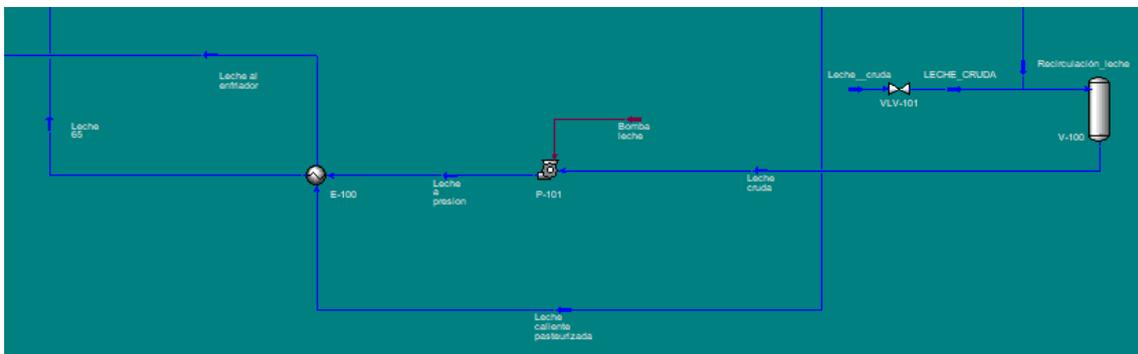


Imagen 21: PFD, sección regenerativa.

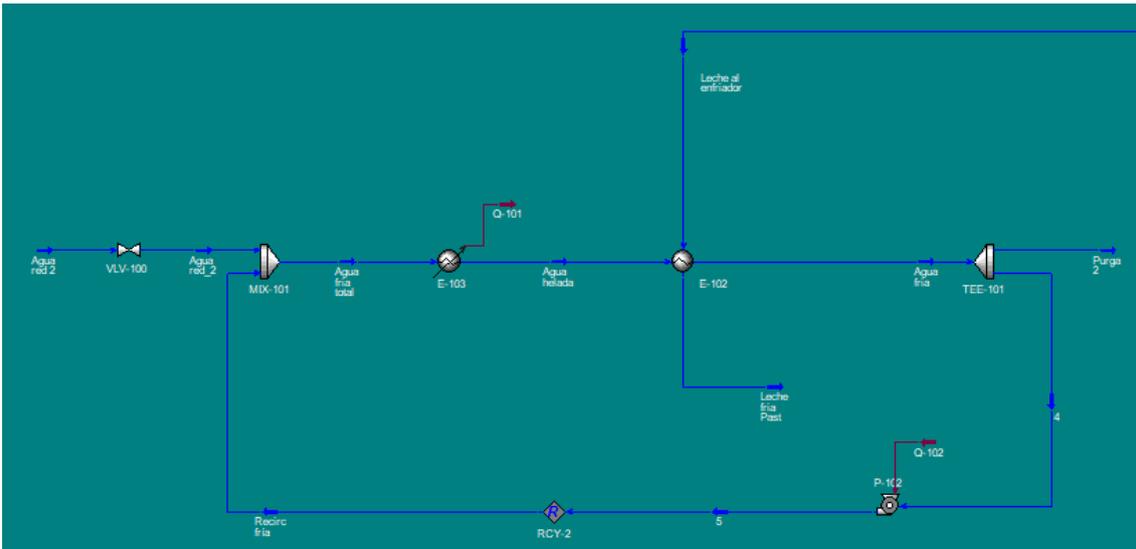


Imagen 22: PFD, sección de enfriamiento.

Las especificaciones finales de las corrientes son las siguientes:

Name	Agua de red	Agua total	Recirculación 1	Agua a 90	Agua a 81	Leche 75	Leche 65
Temperature [C]	20,00	80,60	81,01	90,00	81,00	75,00	65,00
Pressure [bar]	1,300	1,300	1,300	1,200	0,9300	2,249	2,574
Molar Flow [kgmole/h]	1,943	285,6	283,7	285,6	285,6	277,5	277,5
Comp Mole Frac (H2O)	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000
Name	Leche caliente	Agua_a 81	Purga	Recirculación 2	Leche al enfriac	Leche a presior	Leche cruda
Temperature [C]	75,00	81,00	81,00	81,01	14,03	4,025	4,000
Pressure [bar]	2,238	0,9300	0,9300	1,300	1,835	3,000	2,238
Molar Flow [kgmole/h]	277,5	285,6	2,856e-005	285,6	277,5	277,5	277,5
Comp Mole Frac (H2O)	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	-0,0000	-0,0000
Name	Agua helada	Agua fría	Leche fría Past	Agua de red	Agua fría total	Purga 2	4
Temperature [C]	2,000	9,548	4,000	20,00	9,745	9,548	9,548
Pressure [bar]	1,200	0,6130	1,361	1,300	1,300	0,6130	0,6130
Molar Flow [kgmole/h]	341,4	341,4	277,5	2,775	341,4	3,414e-005	341,4
Comp Mole Frac (H2O)	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Name	5	Recirc fría	Agua red_2	Agua de red	Leche_75	Leche_75	LECHE_CRUD,
Temperature [C]	9,570	9,661	20,00	20,00	75,00	75,00	4,000
Pressure [bar]	1,300	1,300	1,300	1,300	2,238	2,238	2,238
Molar Flow [kgmole/h]	341,4	338,6	2,775	1,943	277,5	277,5	277,5
Comp Mole Frac (H2O)	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Name	Recirculación le	Recirculación_1	Leche_cruda	Caldera	Tuberia	Q-100	Bomba leche
Temperature [C]	75,00	75,00	4,000	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>
Pressure [bar]	2,238	2,238	2,238	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>
Molar Flow [kgmole/h]	0,0000	-0,0000	277,5	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>
Comp Mole Frac (H2O)	0,0000	0,0000	-0,0000	<empty>	<empty>	<empty>	<empty>

Imagen 23: Corrientes.

- **Modo Dinámico**

Para pasar a estado dinámico primero se pulsará sobre el botón “Dynamics Assistant”, que se encuentra sobre la barra, al lado del semáforo verde. El asistente de dinámica hace recomendaciones sobre cómo debe cambiar la topología del diagrama de flujo y qué especificaciones de presión y flujo se requieren para ejecutar un caso en modo dinámico.

Además, establece automáticamente los parámetros de tamaño del equipo en el diagrama de flujo de simulación. De todas formas, no es necesario seguir todas las sugerencias que ofrece el Asistente de Dinámica.

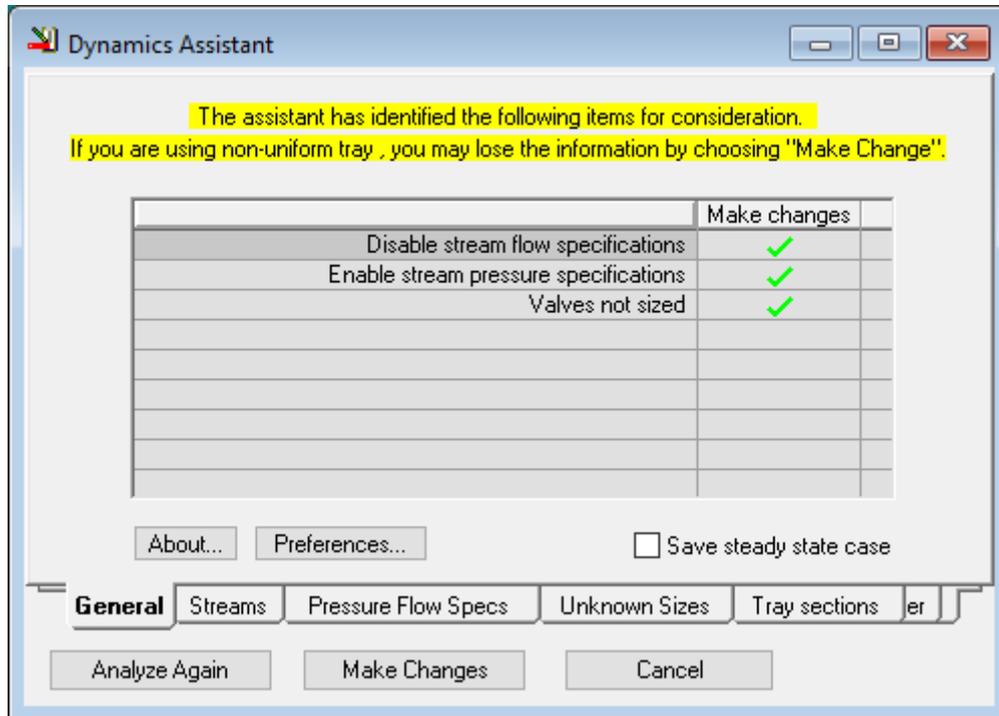


Imagen 24: “Dynamics Assistant”.

Se hace clic en el botón “Make Changes” una sola vez. Todas las sugerencias activas en el Asistente de dinámica se implementan. Se cierra esta ventana.

Se cambia al modo dinámico presionando el icono de “Dynamics mode”, y se selecciona el semáforo verde, para que la simulación empiece a funcionar. Aparecerá un mensaje de aviso sobre el tanque, se pulsa continuar y cuando pregunten si se quiere parar el integrador se presiona “No”.

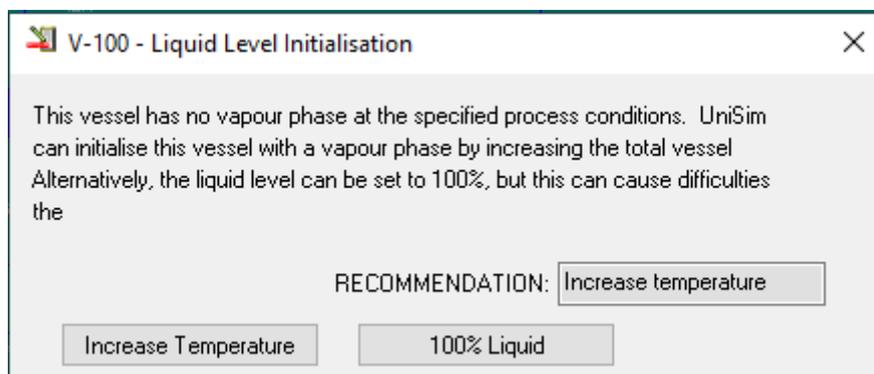


Imagen 25: Nivel de líquido de iniciación del tanque de balance.

Cuando el integrador se ejecuta inicialmente, UniSim Design detectará que el tanque no tiene una fase de vapor en las condiciones de proceso especificadas. Se tiene la opción de seleccionar ya sea el valor por defecto, que es para aumentar la temperatura, o elegir 100% Líquido en el equipo. En este caso se selecciona esta última opción.

Hecho esto, el simulador corre, pero no de manera óptima (los caudales de “Agua de red” y “Agua de red 2” son negativos, es decir están yendo en sentido contrario), hay que realizar algunas modificaciones en el diagrama de flujo:

- Las presiones del agua de entrada de la red (“Agua de red” y “Agua de red 2”) son 2,1 bar.
- Se coloca una válvula después de la corriente “Purga” y a la corriente de salida se le especifica una presión de 1 bar.
- Se le especifica un “Duty” de 0,07 kW a la bomba P-100 y de 0,1460 kW a la bomba P-200.
- Se le especifican a los intercambiadores los valores de UA, teniendo en cuenta el factor de corrección que sufren en modo dinámico. Intercambiador de la sección de calentamiento: 4040 W/°C, intercambiador de la sección regenerativa: 1,5e+5 W/°C e intercambiador de la sección de enfriamiento: 8,8e+4 W/°C.

Con estos cambios el agua fluye en el sentido correcto. Se implementarán entonces controladores PI. Aunque no se requiere que estos controladores funcionen en modo dinámico, aumentarán el realismo del modelo y proporcionarán más estabilidad.

- CONTROLADORES DE CAUDAL.

Se añaden los controladores de caudal de las corrientes de entrada en el proceso. Se selecciona el icono del controlador, se coloca en el PFD, y se especifica lo mostrado en las siguientes tablas tras pulsar en el icono nuevamente.

- “Agua de red”

Tab [Page]	In this cell...	Enter...
Connections	Name	A.Caliente FC
	Process Variable Source	Agua de red , Mass flow
	Output Target Object	VLV-102, Actuator desired position
Parameters (Configuration)	Action	Reverse
	Kc	1
	Ti	0
	PV Minimum	0 kg/h
	PV Maximum	10000

Figura 14: Especificaciones del controlador A. Caliente FC.

- “Agua red 2”

Tab [Page]	In this cell...	Enter...
Connections	Name	A. Fría FC
	Process Variable Source	Agua red 2, Mass flow
	Output Target Object	VLV-100, Actuator desired position
Parameters (Configuration)	Action	Reverse
	Kc	0,17
	Ti	0,00383 min
	PV Minimum	0 kg/h
	PV Maximum	10000 kg/h

Figura 15: Especificaciones del controlador A. Fría FC.

- “Leche__cruda”

Tab [Page]	In this cell...	Enter...
Connections	Name	Leche FC
	Process Variable Source	Leche__cruda, Mass flow
	Output Target Object	VLV-101, Actuator desired position
Parameters (Configuration)	Action	Reverse
	Kc	0,134
	Ti	0,00513 min
	PV Minimum	0 kg/h
	PV Maximum	15000 kg/h

Figura 16: Especificaciones del controlador Leche FC.

Los valores de Kc y Ti, se han obtenido designando el controlador como PI y realizándole un “autotuning” (en la pestaña “Parameters” y “Autotuner”).

- CONTROLADORES DE TEMPERATURA.

A continuación, se instalan los controladores de temperatura, para controlar la temperatura de las corrientes de agua de entrada de los intercambiadores de la sección de calentamiento y de enfriamiento. Se selecciona el icono del controlador, se coloca en el PFD, y se especifica lo mostrado en las siguientes tablas tras pulsar en el icono nuevamente.

- E-104 (Caldera)

Tab [Page]	In this cell...	Enter...
Connections	Name	Caldera TC
	Process Variable Source	Agua a 90, Temperature
	Output Target Object	Caldera, Control Valve
Parameters (Configuration)	Action	Reverse
	Kc	17,2
	Ti	0,123 min
	PV Minimum	0 °C
	PV Maximum	150 °C

Figura 17: Especificaciones del controlador Caldera TC.

- E-103 (Refrigerador)

Tab [Page]	In this cell...	Enter...
Connections	Name	Refrigerante TC
	Process Variable Source	Agua helada, Temperature
	Output Target Object	Refrigerante, Control Valve
Parameters (Configuration)	Action	Direct
	Kc	0,439
	Ti	0,0886 min
	PV Minimum	0 °C
	PV Maximum	4 °C

Figura 18: Especificaciones del controlador Refrigerante TC.

Al igual que a los controladores de caudal, a estos se les realiza un “autotuning” para obtener los valores de k_c y T_i , además se les asigna el modo automático colocándole un “Set Point” de $90\text{ }^\circ\text{C}$ al controlador de la caldera y de 2°C al del refrigerante. Tras especificar estos valores, se pulsa en el botón “Control Valve” y aparece el “FCV For Caldera” y el “FCV For Refrigerante”, donde hay que especificar los valores de “Min. and Max. Available”.

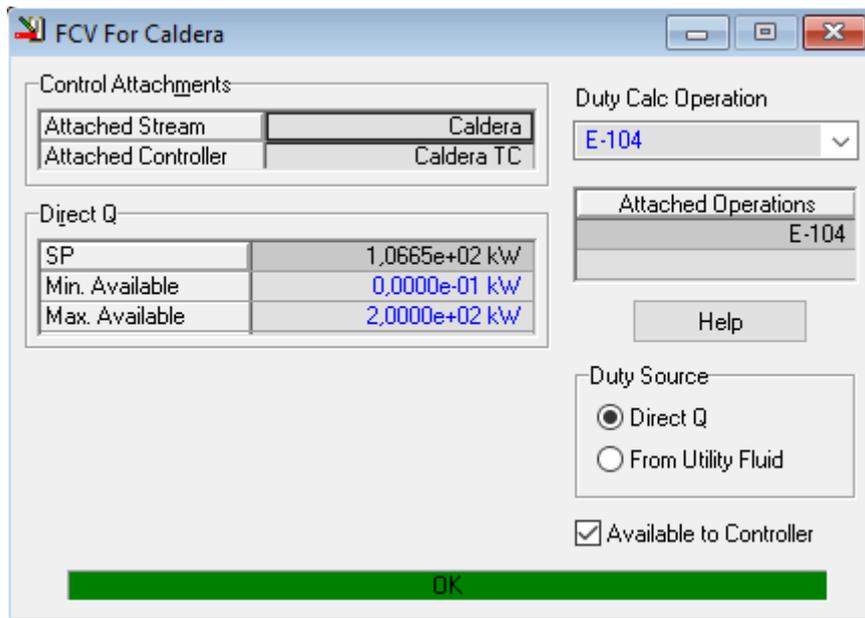


Imagen 26: FCV For Caldera.

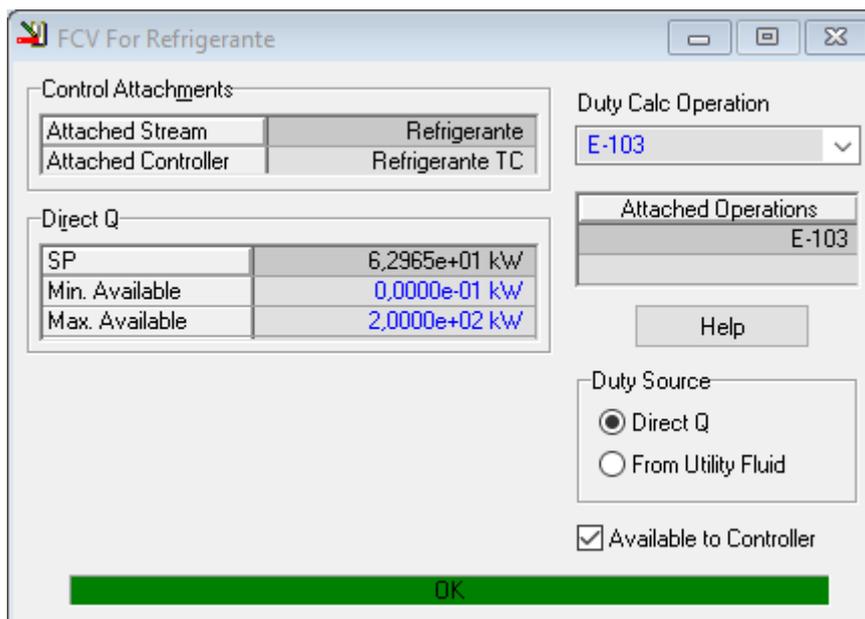


Imagen 27: FCV For Refrigerante.

- Controlador de recirculación o continuación del proceso.

Las válvulas VLV-103 (continuación del proceso) y VLV-104 (recirculación) deben permanecer abiertas o cerradas en función de la temperatura que tenga la corriente “Leche_75”. Para controlarlas, se ha implementado en un “Spreadsheet” el valor que debe tomar la apertura de cada una de ellas en caso de que la temperatura de salida del tubo de mantenimiento sea: inferior a 72 °C (abierta la de recirculación y cerrada la de continuación), superior a 75 °C (cerrada la de recirculación y abierta la de continuación) o se encuentre entre ambas. (abiertas en un porcentaje ambas).

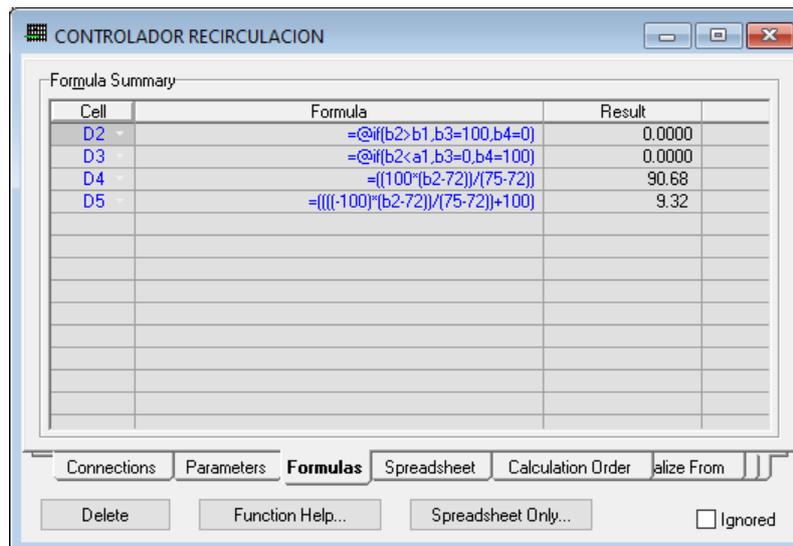


Imagen 28: Fórmulas en el Spreadsheet para el control de la recirculación.



Imagen 29: Resultados en el “Spreadsheet” en un momento concreto. (VLV-103 abierta y VLV-104 cerrada).

Tras esto, la presión de la corriente de entrada “Leche_cruda”, hay que modificarla y especificarle 2,3 bar. Así se evita que, cuando la válvula de recirculación, VLV-104, se abra, el caudal vaya en sentido contrario y que la leche cruda entre al circuito sin sufrir el calentamiento.

Este cambio, hace que el caudal de leche pase de 5000 kg/h a 4987 kg/h aproximadamente. Este cambio, no afecta al tubo de mantenimiento ya que la leche continúa retenida entre 15-30 segundos.

- VÁLVULAS.

Las válvulas deben ser configuradas, junto a los controladores, para que permitan un mayor o menor paso de caudal. Esto se realiza modificándoles el coeficiente de flujo (Cv). Una válvula con un Cv mayor, permite el paso de un mayor caudal con una pérdida de carga más pequeña, mientras que otra con un Cv menor permite el paso de un menor caudal con una mayor pérdida de carga.

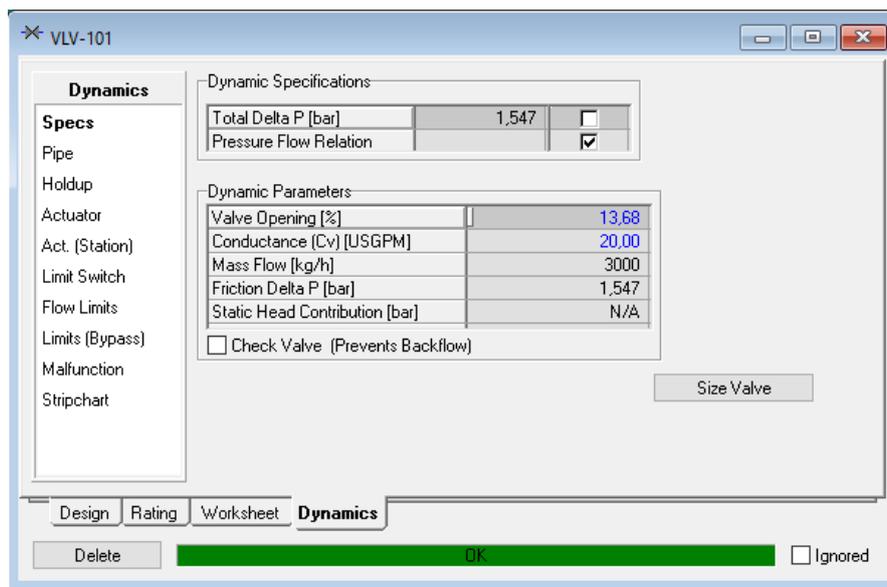


Imagen 30: Pestaña “Dynamics” de la VLV-101.

En el simulador se especifica en la pestaña “Dynamics” y tienen que tomar los siguientes valores:

Código de válvula	Cv (USGPM)
VLV-100	10
VLV-101	20
VLV-102	10
VLV-103	500
VLV-104	500
VLV-105	5

Figura 19: Cv de las válvulas.

Estos valores se han especificado así por el hecho de que le van bien a la simulación, permitiendo obtener unos resultados coherentes y dentro de la reglamentación.

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1. Resultados obtenidos

Las Siguietes tablas reflejan los resultados obtenidos mediante el modelo matemático (realizado con Excel) y a través del UniSim en estado estacionario y en modo dinámico.

SECCIÓN DE CALENTAMIENTO			
Te Frio	65		°C
Ts Frio	75		°C
Te Caliente	90		°C
Ts Caliente	81		°C
UA	3733	3735	W/°C
Calor	54,03	54,04	kW
ΔT_{mi}	15,49	15,49	°C
ΔT_m corregido	14,47	14,47	°C
Caudal Frio	5000	5000	kg/h
Caudal Caliente	5153	5145	kg/h
	Excel	UniSim	

Figura 20: Resultados de la Sección de calentamiento.

SECCION REGENERATIVA			
Te Frio		4,025	°C
Ts Frio		65	°C
Te Caliente		75	°C
Ts Caliente		14,025	°C
UA	3,294E+04	3,295E+04	W/°C
Calor	329,4	329,5	kW
ΔT_{ml}	10	10	°C
ΔT_m corregido	10	10	°C
Caudal Frio	5000	5000	kg/h
Caudal Caliente	5000	5000	kg/h
	Excel	UniSim	

Figura 21: Resultados de la Sección regenerativa.

SECCION DE ENFRIAMIENTO			
Te Frio		2	°C
Ts Frio		9,548	°C
Te Caliente		14,025	°C
Ts Caliente		4	°C
UA	1,76E+04	1,76E+04	W/°C
Calor	54,16	54,18	kW
ΔT_{ml}	3,,074	3,074	°C
ΔT_m corregido	3,074	3,074	°C
Caudal Frio	6135	6150	kg/h
Caudal Caliente	5000	5000	kg/h
	Excel	UniSim	

Figura 22: Resultados de la Sección de enfriamiento.

Modo dinámico (2) (UA)		Sección de Calentamiento	Sección Regenerativa	Sección de Enfriamiento
Te Frio	°C	63,73	4,543	2,00
Ts Frio	°C	74,72	63,73	9,989
Te Caliente	°C	90	74,72	14,83
Ts Caliente	°C	80,2	14,83	4,065
UA	W/°C	4040	1,50E+05	8,80E+04
Ft Factor	-	0,9241	0,20	0,20
UA corregido	W/°C	3733	3,00E+04	1,76E+04
Calor	kW	59,23	319,1	57,37
Caudal Frio	kg/h	4987	4987	6152
Caudal Caliente	kg/h	5180	4929	4929

Figura 23: Resultados de las secciones en modo dinámico, modificando el UA de los intercambiadores de calor.

10.2. Conclusiones

En el presente TFG se realizó la simulación de la pasteurización de la leche en UniSim Design. Las principales conclusiones a las que llegó el Autor son las siguientes:

- Los resultados de los cálculos realizados y la simulación en estado estacionario coinciden, salvo en el caudal de agua. Esto se debe principalmente a que el simulador considera como lineal, la curva que define el calor específico de este componente, mientras que en los cálculos realizados se ha realizado una media de las temperaturas de entrada y salida del intercambiador de la corriente de agua.
- En modo dinámico, los intercambiadores utilizan el factor de corrección (Ft), aunque en estado estacionario se haya indicado que fuera 1. Es por eso, que si se quiere obtener resultados similares en modo dinámico a los del estado estacionario hay que modificar únicamente el UA de los intercambiadores, para que ese valor multiplicado por el factor de corrección resulte en el UA obtenido en estado estacionario.
- El paquete termodinámico Peng-Robinson es adecuado para realizar una simulación de pasteurización de leche.

10.3. Conclusions

At this TFG, the simulation of milk pasteurization was performed at UniSim Design. The author came to the following conclusions:

- The results of the calculations and simulation are the same, except for the water flow. This is mainly due to the fact that the simulator considers as linear, the curve that defines the specific heat of this component, while in the calculations carried out an average of the temperatures of entry and exit of the exchanger of the water stream has been made.
- In dynamics mode, the exchangers use the correction factor (Ft), although in stationary state it has been indicated to be 1. That is why, that if similar results are to be obtained in

dynamics mode to those of the steady state, only the exchanger UA must be modified, so that this value multiplied by the correction factor results in the steady state UA.

- The Peng-Robinson thermodynamic package is suitable for performing a milk pasteurization simulation.

11. BIBLIOGRAFÍA

Alonso, L. (2019). La leche en la historia humana. *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*. <https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/la-gran-explosin-de-la-vida-775/la-leche-en-la-historia-humana-17744>

FENIL. SECTOR LÁCTEO. (2022). Fenil. <http://fenil.org/sector-lacteo-espana/>

González Márquez, M^a. J. (2007). *Diseño de un pasteurizador para helado* (Trabajo fin de grado, Universidad de Cádiz). <https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/6446/33262846.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gutiérrez Fragosa, L. (2010). *Diseño y optimización de un sistema pasteurizador de leche para productores pequeños, mediante simulación en EES (Engineering Equation Solver)*. [Tesis de postgrado, Universidad de Chihuahua]. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2264/1/2010%20-%20Maestria%20-%20Tesis%20-%20Luis%20Gutierrez%20.pdf>

López Ruiz, Á. L., & Barriga Velo, D. (2016). *LA LECHE COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS*.

<https://www.iuntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/436502c6-f47c-42ab-a053-f3ab26dee712/download>

Aguado, J., Calles, J. A., Cañizares, P., López, B., Rodríguez, F., Santos, A., & Serrano, D. (s. f.). Ingeniería de la industria alimentaria. Conceptos básicos (Vol. 1). SINTESIS. https://kupdf.net/download/ingenieria-de-la-industria-alimentaria-volumen-1-conceptos-basicos-j-aguadopdf_59cb891108bbc5b94d686fd2_pdf

Guaraca Pino, E. C., & Guaraca Sigüencia, L. A. (2019). GUÍA TÉCNICA PARA LA PASTEURIZACIÓN DE LA LECHE. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/33798/2/Gu%C3%ADa%20T%C3%A9cnica%20del%20proceso%20de%20Pasteurizaci%C3%B3n%20de%20leche.pdf>

Avellaneda Bargués, A., Vilaseca Ribalta, P., López Matallana, A., Padula, C., Santamaría Hergueta, M. P., Sánchez, P., Ortuño, R., Collado García, F., Nuñez Nuñez, A., & Nava De Olano, B. (2005). Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del sector lácteo. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN. <https://prtr.es/Data/images/Gu%C3%ADa%20MTD%20en%20Espa%C3%B1a%20Sector%20L%C3%A1cteo-EB1D4BEA8B1CEE15.pdf>

Guillén Valera, J., Sánchez-Monge, M., Callejo Mora, A., Gallardo, I., & Sevilla Martínez, M. (2001). Historia de la leche. *CuidatePlus*.

<https://cuidateplus.marca.com/alimentacion/nutricion/2001/03/27/historia-leche-9784.html>

12. ANEXO

Propiedades del agua (Temperatura en Kelvin):

El programa UniSim Design dispone de las siguientes propiedades en su base de datos

- Capacidad calorífica [kJ/kmol°C]:

$$276,4 - 2,090 T + 8,125 \times 10^{-3} T^2 - 1,412 \times 10^{-5} T^3 + 9,370 \times 10^{-9} T^4$$

- Densidad molar [kg/kmol]:

$$58,30 - 5,384 \times 10^{-3} T - 2,488 \times 10^{-5} T^2 + 4,748 \times 10^{-8} T^3 - 1,326 \times 10^{-7} T^4$$

- Conductividad térmica [W/mK]:

$$-0,4320 + 5,725 \times 10^{-3} T - 8,078 \times 10^{-6} T^2 + 1,861 \times 10^{-9} T^3$$

- Viscosidad [cP]:

$$47,00 - 0,3882 T + 1,194 \times 10^{-3} T^2 - 1,614 \times 10^{-6} T^3 + 8,076 \times 10^{-10} T^4$$

- Gráfica para la determinación del Factor de corrección (F_T) en función de R y E:

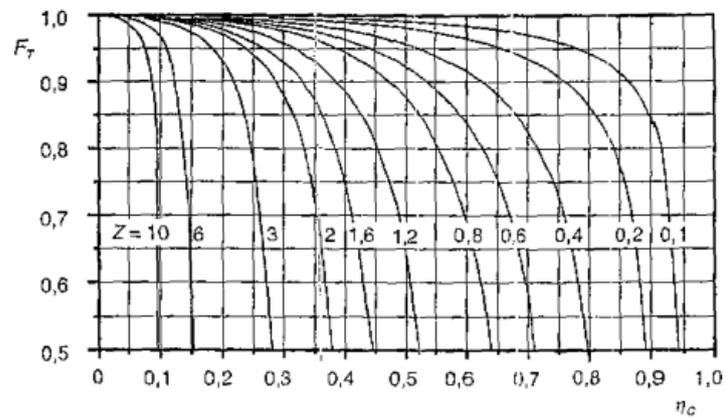


Figura 24: Factor de corrección para intercambiadores de 1 paso por carcasa y 2 por tubos. Reproducido de Ingeniería de la industria alimentaria. Conceptos básicos (Vol. 1), J. Aguado Alonso et al., s.f., Recuperado de https://kupdf.net/download/ingenieria-de-la-industria-alimentaria-volumen-1-conceptos-basicos-j-aguadopdf_59cb891108bbc5b94d686fd2_pdf Copyright s.f. por Reproducido con permiso.

V-100

Tanque de balance

D: 3,488 m
L: 5,232 m

TM-100

Tubo de mantenimiento

Din: 51,40 mm
L: 11,36 m

P-100

Bomba centrífuga

dP: 0,369 bar
P: 0,072 kW

P-101

Bomba centrífuga

dP: 0,7624 bar
P: 0,136 kW

P-102

Bomba centrífuga

dP: 0,797 bar
P: 0,182 kW

E-104

Caldera

P: 56,46 kW

LISTADO DE EQUIPOS

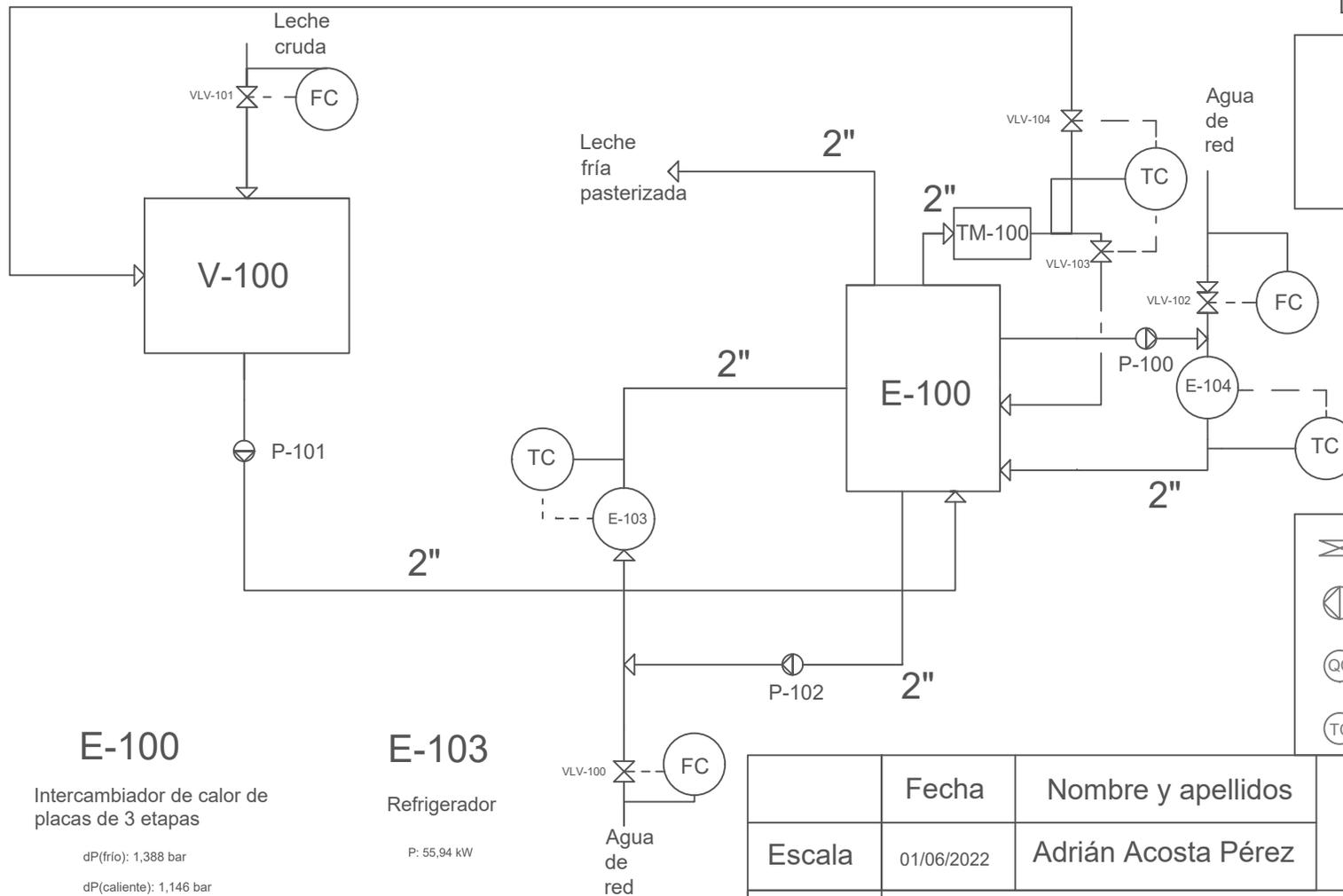
V-100 / TM-100

P-100 / P-101 / P-102

E-100 / E-103 / E-104

LEYENDA

-  Válvula
-  Bomba
-  Controlador de caudal másico
-  Controlador de temperatura



E-100

Intercambiador de calor de placas de 3 etapas

dP(frío): 1,388 bar
dP(caliente): 1,146 bar
UA: 54305 W/°C

E-103

Refrigerador

P: 55,94 kW

	Fecha	Nombre y apellidos	DIAGRAMA P&ID
Escala	01/06/2022	Adrián Acosta Pérez	
S.E	UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA		