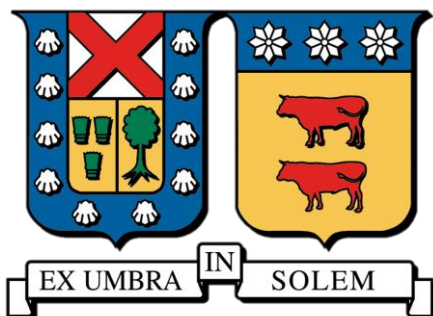


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL



“DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA EL
ANÁLISIS
INTEGRADO DE INOCUIDAD Y CALIDAD EN PROCESOS DE
ESTERILIZACIÓN CONTINUA DE ALIMENTOS LÍQUIDOS
UTILIZANDO ASPEN PLUS V14”

RAFAEL ANDRÉS ETCHEGARAY ARMIJO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

Profesor Guía: Sergio Almonacid Merino

Profesor Correferente: Santiago García Gen

JULIO-2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Desarrollo de un laboratorio virtual para el análisis integrado de inocuidad y calidad en procesos de esterilización continua de alimentos líquidos utilizando Aspen Plus V14

Nombre del candidato(a): Rafael Andrés Etchegaray Armijo

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Química

Campus: Valparaíso **Departamento:** Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sergio Almonacid Merino, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 28/08/2026 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 28/08/2026 **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que, de una u otra forma, hicieron posible el desarrollo de esta memoria de titulación y me acompañaron a lo largo de este importante proceso.

En primer lugar, agradezco a mi profesor guía, Sergio Almanacid, por confiar en mí al proponerme este tema de investigación y por su orientación durante el desarrollo de esta memoria. Asimismo, agradezco a mi profesor correferente, Santiago García, por su apoyo, disposición y valiosas sugerencias durante el desarrollo de la simulación.

A mi familia, especialmente a mis padres, mis hermanas y mi tía, les debo un agradecimiento infinito. Gracias por el amor, el apoyo incondicional y la confianza que siempre depositaron en mí. Gracias por brindarme la oportunidad de acceder a una educación de calidad y por inculcarme valores como la responsabilidad, el esfuerzo, la perseverancia y la honestidad, fundamentales para enfrentar cada desafío de mi formación universitaria. En los momentos más difíciles siempre estuvieron presentes para levantarme el ánimo y recordarme que era capaz de alcanzar esta meta. Finalmente, agradezco a mi sobrino, cuya llegada se convirtió en una fuente constante de motivación, me impulsó a perseverar y transformó profundamente mi manera de ver la vida.

A mis amigos, gracias por acompañarme durante todos estos años de universidad. Su apoyo, compañía y palabras de aliento hicieron que esta etapa fuera mucho más enriquecedora y me dieron la motivación para seguir adelante en cada momento de dificultad.

Finalmente, quiero agradecer de manera muy especial a mi pareja, Sofia, por haber estado a mi lado durante todo este camino, incluso desde antes de comenzar esta etapa universitaria. Gracias por tu amor, tu paciencia y por creer siempre en mí. Tu forma de ver la vida, tu alegría y tu constante apoyo han sido una inspiración que me ha impulsado a crecer tanto en lo personal como en lo profesional. Gracias por darme la fuerza y la motivación necesarias para seguir avanzando y cumplir cada una de las metas que nos hemos propuesto juntos.

A todos ustedes, muchas gracias por formar parte de este logro, que también les pertenece.

RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un laboratorio virtual para el análisis integrado de inocuidad y calidad en procesos de esterilización continua de alimentos líquidos mediante Aspen Plus V14. El caso base corresponde a leche procesada en un tren UHT indirecto compuesto por regeneración térmica, calentamiento rápido, tubo de retención, regeneración de salida y enfriamiento final. La motivación principal radica en construir una herramienta virtual que permita representar, modificar y analizar de manera didáctica distintas configuraciones de un proceso UHT, facilitando la comprensión del comportamiento térmico del sistema y del efecto que tienen las variables de operación sobre el desempeño global del proceso. A través de este laboratorio virtual es posible estudiar el funcionamiento del tren UHT sin depender de una planta piloto física, observar la interacción entre las etapas de calentamiento, retención, regeneración y enfriamiento, y evaluar cómo distintas condiciones de operación afectan simultáneamente la inocuidad microbiológica, la calidad del producto y la eficiencia energética. Para lograrlo, se desarrolló una metodología que integra Aspen Plus V14, Aspen Exchanger Design and Rating (EDR), bloques Calculator y hojas de cálculo en Excel. Aspen Plus resuelve los balances de masa y energía, EDR proporciona geometrías, coeficientes y perfiles térmicos, Calculator permite importar y exportar variables del flowsheet, y Excel ejecuta cálculos de integración numérica para letalidad, calidad y dimensionamiento del tubo de retención.

El modelo incorpora cinética térmica mediante parámetros D , z y F_0 , utiliza el criterio 12D para las esporas de *Clostridium botulinum*, empleadas como objetivo microbiológico de referencia y calcula el largo requerido del tubo de retención como variable dependiente de las condiciones de operación. Además, se implementa el cálculo de calidad como fracción retenida del atributo seleccionado, considerando el perfil radial de velocidad en el tubo y la historia térmica variable en los intercambiadores. Se incluyen secciones de resultados para condición base y una estructura de análisis de sensibilidad frente a temperatura objetivo UHT, de modo que el usuario pueda incorporar resultados de simulación a distintas condiciones y discutir el compromiso entre inocuidad, calidad y energía. El aporte central del trabajo es convertir un flowsheet de simulación en una herramienta formativa y de diseño capaz de evidenciar fenómenos que no son directamente visibles en el simulador convencional.

ABSTRACT

This work develops a virtual laboratory for the integrated analysis of safety and quality in continuous sterilization processes of liquid foods using Aspen Plus V14. The base case corresponds to milk processed in an indirect UHT train composed of thermal regeneration, rapid heating, a holding tube, outlet regeneration, and final cooling. The main motivation is to build a virtual tool that allows different UHT process configurations to be represented, modified, and analyzed in a didactic way, facilitating the understanding of the thermal behavior of the system and the effect of operating variables on the overall process performance. Through this virtual laboratory, it is possible to study the operation of the UHT train without relying on a physical pilot plant, observe the interaction between the heating, holding, regeneration, and cooling stages, and evaluate how different operating conditions simultaneously affect microbiological safety, product quality, and energy efficiency. To achieve this, a methodology integrating Aspen Plus V14, Aspen Exchanger Design and Rating (EDR), Calculator blocks, and Excel spreadsheets was developed. Aspen Plus solves the mass and energy balances, EDR provides geometries, heat transfer coefficients, and thermal profiles, Calculator enables the import and export of flowsheet variables, and Excel performs numerical integration calculations for lethality, quality, and holding tube sizing.

The model incorporates thermal kinetics through D , z , and F_0 parameters, applies the 12D criterion to *Clostridium botulinum* spores, used as the reference microbial target, and calculates the required holding tube length as a variable dependent on the operating conditions. In addition, quality is calculated as the retained fraction of the selected attribute, considering the radial velocity profile in the holding tube and the variable thermal history in the heat exchangers. The work includes result sections for the base operating condition and a sensitivity analysis structure with respect to the UHT target temperature, allowing the user to incorporate simulation results at different conditions and discuss the trade-off between safety, quality, and energy. The main contribution of this work is the transformation of a simulation flowsheet into a formative and design tool capable of showing phenomena that are not directly visible in a conventional process simulator.

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidad típica
A	Área de transferencia de calor	m ²
C/C0	Fracción retenida del atributo de calidad	-
D(T)	Tiempo decimal a una temperatura T	min o s
Dref	Tiempo decimal a temperatura de referencia	min o s
F0	Tiempo equivalente de letalidad térmica	min
k(T)	Constante cinética dependiente de la temperatura	1/min
L	Largo del tubo de retención	m
Q	Caudal volumétrico	m ³ /s
r	Coordenada radial	m
R	Radio interno del tubo	m
Tref	Temperatura de referencia	°C
T(t)	Temperatura como función del tiempo	°C
v(r)	Velocidad local en función del radio	m/s
z	Incremento térmico para cambiar D en un ciclo decimal	°C
U	Coefficiente global de transferencia de calor	W/m ² K

EDR	Aspen Exchanger Design and Rating	-
UHT	Ultra High Temperature	-

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
NOMENCLATURA.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS	12
1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Planteamiento del problema	15
1.2. Justificación del trabajo	16
1.3. Objetivo General.....	17
1.4. Objetivos específicos.....	17
1.5. Alcance y limitaciones.....	18
2. CAPÍTULO II. ANTECEDENTES GENERALES Y SEGURIDAD ALIMENTARIA	19
2.1. Importancia de la seguridad alimentaria.....	19
2.2. Esterilidad comercial y alimentos de baja acidez.....	20
2.3. Relevancia industrial del procesamiento UHT	20
2.4. Laboratorios virtuales en ingeniería de alimentos.....	21
3. CAPÍTULO III. FENOMENOLOGÍA DEL PROCESO UHT.....	23
3.1. Cinética térmica de inactivación.....	23
3.2. Valor F0 y equivalencia térmica.....	25
3.3. Perfil de velocidad y tiempo de residencia	27
3.4. Deterioro de calidad por temperatura	28
3.5. Regeneración térmica y compromiso integrado	30
4. CAPÍTULO IV. MODELACIÓN Y METODOLOGÍA EN ASPEN PLUS V14	32

4.1.	Enfoque general de modelación	32
4.2.	Definición de componentes	32
4.3.	Paquete termodinámico NRTL.....	39
4.4.	Construcción del flowsheet	41
4.4.1.	Construcción inicial del sistema UHT.....	41
4.4.2.	Conversión del UHT a un intercambiador riguroso de placas.....	44
4.4.3.	Incorporación del tubo de retención	46
4.4.4.	Construcción del intercambiador de regeneración	48
4.4.5.	Incorporación del divisor de flujo	51
4.4.6.	Construcción del sistema de enfriamiento.....	53
4.4.7.	Flowsheet completo.....	55
4.5.	Design Specs de servicios auxiliares	56
4.5.1.	Design Spec para el servicio de vapor del UHT.....	57
4.5.2.	Design Spec para el servicio de agua del cooler	60
4.6.	Diseño con Aspen EDR.....	62
4.6.1.	Diseño del intercambiador UHT	62
4.6.2.	Diseño del regenerador.....	64
4.6.3.	Diseño del cooler	67
4.7.	Calculator y Excel como núcleo de integración	70
4.7.1.	Calculator del tubo de retención.....	71
4.7.2.	Calculator del intercambiador de regeneración	73
4.7.3.	Calculator del cooler.....	75
4.7.4.	Calculator principal e interfaz del laboratorio virtual	77
5.	CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	83
5.1.	Condición base de operación.....	83

5.2.	Resultados térmicos e hidráulicos	84
5.2.1.	Servicio de vapor del UHT y agua COOLER	86
5.3.	Dimensionamiento del tubo de retención	87
5.4.	Resultados de inocuidad	89
5.5.	Resultados de calidad	90
5.6.	Resultados económicos del caso base	92
5.7.	Discusión integrada	94
6.	CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	96
6.1.	Propósito del análisis de sensibilidad	96
6.2.	Condiciones del análisis	96
6.3.	Efecto sobre el tubo de retención	98
6.4.	Efecto sobre la inocuidad	100
6.5.	Efecto sobre la calidad.....	101
6.6.	Efecto sobre los servicios térmicos	103
6.7.	Análisis económico de los escenarios	104
6.8.	Discusión integrada	106
6.9.	Principales resultados del análisis	107
7.	CAPÍTULO VII. MANUAL DE OPERACIÓN	109
7.1.	Objetivo del manual de operación	109
7.2.	Apertura de la simulación.....	110
7.3.	Apertura de los bloques Calculator y sus hojas de cálculo	110
7.3.1.	Apertura del Calculator principal	111
7.3.2.	Apertura del Calculator del tubo de retención.....	112
7.3.3.	Apertura del Calculator del cooler.....	112
7.3.4.	Apertura del Calculator de regeneración	113

7.4.	Configuración de las condiciones de operación	113
7.5.	Selección del alimento.....	114
7.6.	Selección del parámetro de calidad	115
7.7.	Activación de la secuencia del Calculator principal.....	116
7.8.	Ejecución de la simulación	117
7.9.	Revisión de los cálculos en las hojas de Excel.....	118
7.10.	Revisión de resultados en la interfaz principal	119
7.11.	Evaluación económica.....	120
7.12.	Consulta del diseño de los intercambiadores.....	121
7.13.	Ejecución de un nuevo escenario.....	123
7.14.	Consideraciones para una operación correcta	124
8.	CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
8.1.	Conclusiones.....	126
8.2.	Recomendaciones	127
	BIBLIOGRAFIA	129
	ANEXOS.....	132
	Anexo 1: Overall Performance UHT caso base.....	132
	Anexo 2: DataSheet UHT caso base.....	133
	Anexo 3: Overall Performance Regeneración caso base.....	134
	Anexo 4: DataSheet regeneración caso base.	135
	Anexo 5: Overall Performance Cooler caso base.	136
	Anexo 6: DataSheet cooler caso base.....	137
	Anexo 7: Construcción Proceso de esterilización continua de Leche.	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. componentes de leche.....	37
Tabla 2. Condiciones de operación caso base.	83
Tabla 3. Resultados de Temperatura y Presión.	85
Tabla 4. Resultados servicios térmico.	86
Tabla 5. Dimensionamiento tubo de retención.	87
Tabla 6. Contribución de cada etapa al F0 total	89
Tabla 7. Retención de calidad por etapa.....	91
Tabla 8. Resumen económico del caso base	92
Tabla 9. Costos de los equipos principales.....	93
Tabla 10. Condiciones constantes del análisis de sensibilidad.....	96
Tabla 11. Resultados generales del análisis de sensibilidad.....	97
Tabla 12. Sensibilidad del tubo de retención frente a la temperatura UHT	99
Tabla 13. Resultados de inocuidad para las temperaturas evaluadas	100
Tabla 14. Retención del parámetro de calidad por etapa.....	101
Tabla 15. Requerimientos térmicos del UHT y del cooler	103
Tabla 16. Comparación económica de los escenarios analizados	104
Tabla 17. Orden obligatorio de apertura de los bloques Calculator	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Thermal Death Time curve (TDT).....	24
Figura 2. Esquema calidad en tubo.....	29
Figura 3. pestaña de componentes.....	33
Figura 4. Databanks de componentes.....	34
Figura 5. Pestaña de selección de componentes.....	35
Figura 6. pestaña de elección de método Termodinámico	39
Figura 7. visualización de Exchange en paleta del Flowsheet	42
Figura 8. especificación intercambiador UHT.	43
Figura 9. pestaña emergente Rigurous Exchanger	44
Figura 10. Process Data intercambiador UHT.....	45
Figura 11. sección de elección de material.....	46
Figura 12. Especificación Tubo de retención.	47
Figura 13. especificación intercambiador regeneración.	49
Figura 14. especificación del intercambiador de tubo y coraza en regeneración.	50
Figura 15. Process Data intercambiador de regeneración	51
Figura 16. Geometría del intercambiador de regeneración	51
Figura 17. Paleta con Split.....	52
Figura 18. Especificación del intercambiador de refrigeración.....	54
Figura 19. Geometría del intercambiador de refrigeración	55
Figura 20. Process Data del intercambiador de refrigeración.	55
Figura 21. Flowsheet Completo.	56
Figura 22. Design spec vapor UHT	57
Figura 23. Especificaciones Design spec UHT.	58
Figura 24. Especificación flujo variable de vapor.....	59
Figura 25. Design spec flujo de agua refrigeración.....	60
Figura 26. especificación Design spec refrigeración.....	61
Figura 27. Especificación flujo variable de agua.	61
Figura 28. Geometría del intercambiador de placas.	63
Figura 29. Geometría coraza intercambiador de regeneración.....	65
Figura 30. Geometría Tubos intercambiador de regeneración	66

Figura 31. Perfil de temperatura intercambiador de regeneración	67
Figura 32. Geometría coraza intercambiador de refrigeración.....	68
Figura 33. Geometría tubos intercambiador de refrigeración.....	69
Figura 34. Perfil de temperatura intercambiador de refrigeración	70
Figura 35. definición de variables del Calculator tubo de retención	71
Figura 36. método de cálculo.	72
Figura 37. Secuencia de cálculo tubo de retención.	73
Figura 38. definición de variables del Calculator regeneración	74
Figura 39. definición de variables del Calculator refrigeración.	76
Figura 40. Interfaz condiciones de operación.....	77
Figura 41. Interfaz resultados de la simulación.	78
Figura 42. Calculo Flujo molar para simulación.	79
Figura 43. Secuencia de Calculator en Flowsheet.	110
Figura 44. Pestaña Sequence para correr la simulación.	116
Figura 45. Evaluación económica realizada en Aspen.	121
Figura 46. caracterización corriente de entrada a proceso.....	138
Figura 47. Especificación del intercambiador de placas.	139
Figura 48. caracterización del flujo de servicio del intercambiador de placas.....	139
Figura 49. pestaña define construcción Design Specs del intercambiador de placas. .	140
Figura 50. Pestaña spec construcción Design Specs del intercambiador de placas. ...	140
Figura 51. pestaña vary construcción Design Specs del intercambiador de placas.....	141
Figura 52. caracterización segmento de tubería (tubo de retención).....	141
Figura 53. caracterización térmica del segmento de tubería.	142
Figura 54. Variables importadas y exportadas calculator del tubo de retención.....	143
Figura 55. pestaña sequence del calculator del tubo de retención.....	143
Figura 56. Especificación del intercambiador de regeneración.....	144
Figura 57. Variables importadas y exportadas calculator del intercambiador de regeneración.....	145
Figura 58. pestaña sequence del calculator del intercambiador de regeneración.....	145
Figura 59. Configuración Split.	146
Figura 60. Variable exportada e importada en calculator para controlar Split.....	146

Figura 61. Código para controlar Split.	146
Figura 62. Pestaña sequence del calculator del Split.....	147
Figura 63. Especificación del intercambiador de refrigeración.....	147
Figura 64. caracterización del flujo de servicio del intercambiador de refrigeración previo a design spec.....	148
Figura 65. Variables importadas para calculator del intercambiador de refrigeración.	149
Figura 66. Sequence para el calculator del intercambiador de refrigeración.	149
Figura 67. Pestaña Define construcción Design Specs del intercambiador de refrigeración.....	150
Figura 68. Pestaña Spec construcción Design Specs del intercambiador de refrigeración.	150
Figura 69. Pestaña Vary construcción Design Specs del intercambiador de refrigeración.	151
Figura 70. Variables importadas y exportadas calculator principal (1)	152
Figura 71: Variables importadas y exportadas calculator principal (2)	153
Figura 72. Sequence del calculator principal.....	154

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La esterilización continua de alimentos líquidos constituye una operación de alta relevancia industrial porque permite extender la vida útil de productos de consumo masivo sin depender exclusivamente de la cadena de frío. En alimentos como la leche, la seguridad del producto no solo depende de alcanzar una temperatura determinada, sino de asegurar que la historia térmica acumulada sea suficiente para inactivar microorganismos de interés, particularmente aquellos con formas esporuladas de elevada resistencia. Esta exigencia genera un problema de diseño complejo: el proceso debe ser suficientemente severo para cumplir un criterio microbiológico, pero no tan severo como para producir un deterioro innecesario de atributos de calidad. El trabajo de memoria se inserta precisamente en ese punto de tensión, buscando desarrollar una herramienta que permita analizar el proceso completo desde una perspectiva integrada.

En la práctica industrial, un tren UHT indirecto involucra múltiples operaciones acopladas: regeneración térmica, calentamiento final, retención y enfriamiento (Singh & Heldman, 2014). Cada una de estas etapas modifica la temperatura del producto y, por lo tanto, contribuye de manera distinta a la letalidad y al daño de calidad. Sin embargo, en una simulación de procesos convencional el resultado suele observarse principalmente como temperaturas, presiones, caudales y deberes térmicos. Estos datos son necesarios, pero no suficientes para juzgar si un tratamiento térmico es adecuado desde el punto de vista alimentario. Se requiere traducir los perfiles de temperatura y los tiempos de residencia a indicadores de inocuidad y calidad.

El problema abordado por esta memoria consiste en convertir un flowsheet de Aspen Plus V14 en un laboratorio virtual capaz de responder preguntas propias del procesamiento térmico de alimentos. Por ejemplo, qué temperatura objetivo permite cumplir el criterio 12D, cuánto debe medir el tubo de retención para una condición dada, qué etapa aporta más al deterioro del atributo de calidad seleccionado, cómo cambia el consumo de vapor al modificar la temperatura UHT y qué efecto tiene la recuperación energética en el balance global. Este enfoque permite que la simulación no sea solamente una representación de equipos, sino una herramienta de análisis y aprendizaje.

La necesidad de este tipo de herramienta se relaciona también con limitaciones prácticas del laboratorio físico. Un tren UHT piloto o industrial implica altos costos de instalación, operación, limpieza, validación sanitaria y control de riesgos. Además, modificar condiciones críticas, como caudal, temperatura o geometría del tubo, puede no ser trivial en una planta real. El laboratorio virtual permite estudiar esos escenarios de forma segura, repetible y trazable, manteniendo la conexión con balances de masa y energía reales calculados por Aspen Plus.

1.2. Justificación del trabajo

La inocuidad alimentaria es un requisito esencial para cualquier proceso térmico, pero en alimentos líquidos de baja acidez la exigencia se vuelve particularmente estricta debido a la posible presencia de esporas termorresistentes (Codex Alimentarius Commission, 1993). Un alimento puede parecer estable desde el punto de vista físico o sensorial y, aun así, no ser seguro si no se ha alcanzado la letalidad térmica adecuada. Por ello, el diseño de procesos UHT debe basarse en criterios cuantitativos y no únicamente en reglas empíricas. El valor F_0 , los parámetros D , z y el número de reducciones decimales constituyen herramientas fundamentales para traducir un tratamiento térmico en una medida de efecto microbiológico.

Junto con la inocuidad, la calidad del producto es un criterio de diseño igualmente relevante. La leche contiene componentes sensibles al calor, incluyendo proteínas, vitaminas, azúcares y aminoácidos que pueden participar en reacciones de pardeamiento, desnaturalización o pérdida nutricional. El tratamiento UHT se caracteriza por aplicar temperaturas altas durante tiempos cortos justamente para equilibrar seguridad y preservación de calidad. Sin embargo, ese equilibrio depende de la temperatura objetivo, tiempo de retención, geometría, flujo, perfiles térmicos en los intercambiadores y de las propiedades cinéticas del atributo analizado.

La justificación técnica de la memoria radica en la integración de estos criterios dentro de una misma plataforma. Aspen Plus V14 permite resolver el proceso con rigurosidad termodinámica y energética, pero no calcula automáticamente indicadores de inocuidad o deterioro cinético como parte estándar del flowsheet. Por ello, se incorporan bloques Calculator y hojas Excel para complementar la simulación con cálculos propios de ingeniería de alimentos. Esta integración permite que cada modificación en el proceso se refleje en variables de desempeño más relevantes para el diseño UHT.

Desde el punto de vista pedagógico, la herramienta propuesta permite visualizar el compromiso inocuidad-calidad-energía de forma cuantitativa. En lugar de estudiar por separado las ecuaciones de letalidad, los balances de energía y el diseño de intercambiadores, el laboratorio virtual los conecta en un solo caso de estudio. Esta estructura facilita que el usuario comprenda que una decisión de operación, como aumentar la temperatura UHT, no solo modifica el vapor requerido, sino también el tiempo necesario de retención, el largo del tubo, el F0 acumulado y la calidad final retenida.

1.3. Objetivo General

Diseñar, implementar y validar un laboratorio virtual de esterilización continua indirecta tipo UHT en Aspen Plus V14 y EDR, capaz de diseñar y operar el tren de proceso, calcular indicadores de inocuidad microbiológica y evaluar el deterioro de calidad bajo distintas condiciones de operación.

1.4. Objetivos específicos

Implementar en Aspen Plus V14 un modelo de esterilización continua UHT con regeneración, calentamiento, retención y enfriamiento, incorporando el diseño de intercambiadores mediante Aspen EDR. Este objetivo reúne la construcción del flowsheet, la definición de corrientes, la selección de componentes, el paquete termodinámico, la configuración de bloques de intercambio y la generación de un modelo base que represente adecuadamente el proceso.

Desarrollar metodologías para calcular inocuidad y calidad usando perfiles de temperatura, tiempos de residencia y cinética térmica del producto. Esto implica implementar el cálculo de F0 en el tubo de retención y en equipos de temperatura variable, incorporar la relación $D(T)$, integrar el perfil radial de velocidad y utilizar discretización por segmentos para los intercambiadores.

Fortalecer el aprendizaje de fundamentos de procesamiento térmico mediante un laboratorio virtual modificable. El resultado esperado no es solo un caso de simulación estático, sino una plataforma capaz de variar condiciones de operación, comparar escenarios y mostrar cómo cambian los indicadores relevantes de diseño, inocuidad, calidad y energía.

1.5. Alcance y limitaciones

El alcance del trabajo se centra en la construcción de un modelo estacionario en Aspen Plus V14 aplicado a leche como caso base de alimento líquido. La elección de un modelo estacionario responde a la necesidad de consolidar primero balances consistentes, dimensionamiento de equipos y vínculos de cálculo. El laboratorio virtual desarrollado se enfoca en condiciones de operación de régimen permanente y en análisis de sensibilidad paramétrica.

La leche se representa mediante una mezcla simplificada de componentes disponibles en Aspen Plus. Esta simplificación es necesaria porque la leche real es una matriz coloidal compleja que contiene agua, grasa, proteínas, lactosa, sales y compuestos menores. El objetivo del modelo no es describir cada interacción molecular de la leche, sino obtener propiedades térmicas y de flujo suficientes para evaluar el proceso UHT desde el punto de vista de balances, diseño térmico e indicadores cinéticos.

El trabajo no pretende reemplazar una validación microbiológica experimental ni una prueba industrial de esterilidad comercial. La inocuidad calculada representa una herramienta de diseño basada en cinética térmica, pero la liberación sanitaria de un producto requiere procedimientos experimentales, control de envases, limpieza, esterilización del sistema y validaciones propias de la industria alimentaria. En este sentido, el laboratorio virtual es una herramienta de análisis y enseñanza, no un sustituto del sistema de aseguramiento de calidad industrial.

Otra limitación relevante es que el deterioro de calidad se calcula para un atributo seleccionado y no para la calidad global de la leche. Cuando el modelo entrega una retención de calidad, este valor debe interpretarse como la fracción remanente del parámetro cinético elegido, por ejemplo, pardeamiento o color. No representa la aceptabilidad sensorial total ni la calidad nutricional integral del producto, sino una métrica específica que permite comparar condiciones y etapas.

2. CAPÍTULO II. ANTECEDENTES GENERALES Y SEGURIDAD ALIMENTARIA

2.1. Importancia de la seguridad alimentaria

La seguridad alimentaria, entendida desde la perspectiva de inocuidad, busca asegurar que los alimentos no causen daño al consumidor cuando se preparan y consumen de acuerdo con su uso previsto. Esta definición es especialmente importante en alimentos procesados térmicamente, porque el consumidor no puede verificar visualmente la ausencia de patógenos o toxinas. La inocuidad debe ser diseñada dentro del proceso y respaldada por criterios cuantitativos, controles operacionales y validaciones adecuadas.

Los alimentos líquidos listos para consumo presentan desafíos específicos. Al ser matrices con alta actividad de agua, pueden permitir el desarrollo de microorganismos si no se controlan adecuadamente las condiciones de proceso, envase y almacenamiento (U.S. Food and Drug Administration, 1984). En productos de baja acidez, la estabilidad a temperatura ambiente requiere considerar microorganismos esporulados capaces de resistir tratamientos térmicos moderados. Por eso, la industria utiliza tratamientos severos como UHT, combinados con envasado aséptico, para obtener productos comercialmente estériles.

El concepto de inocuidad no debe confundirse con el de calidad. Un alimento puede cumplir estándares sensoriales y aun así ser inseguro, o puede ser seguro, pero presentar deterioro de atributos de calidad debido a un tratamiento excesivo. Esta distinción justifica que el modelo desarrollado en la memoria separe explícitamente los indicadores de letalidad y de calidad. La primera dimensión responde a la reducción microbiana, mientras que la segunda responde a la conservación de atributos del producto.

En el contexto de la ingeniería de procesos, la seguridad alimentaria exige que las variables críticas sean identificadas y cuantificadas. En un tren UHT, las variables clave son temperatura, tiempo de residencia, caudal, presión, geometría del tubo, perfil térmico de intercambiadores y condiciones de enfriamiento. Si alguna de estas variables cambia, el nivel de letalidad y el deterioro de calidad también pueden cambiar. Por lo tanto, un laboratorio virtual debe ser capaz de recalcular los indicadores cada vez que se modifica la operación.

2.2. Esterilidad comercial y alimentos de baja acidez

La esterilidad comercial no implica la ausencia absoluta de todo microorganismo, sino la ausencia de microorganismos capaces de crecer bajo las condiciones normales de almacenamiento del alimento. Este criterio es realista porque la esterilidad absoluta sería difícil de demostrar en términos prácticos y no siempre es necesaria para asegurar un producto estable. En procesos UHT, la esterilidad comercial se logra mediante una combinación de tratamiento térmico, envasado aséptico, limpieza adecuada y control de la cadena de producción.

Los alimentos de baja acidez, generalmente definidos por un pH mayor a 4,5, son de especial preocupación porque permiten la posible germinación y crecimiento de microorganismos esporulados bajo condiciones anaerobias si el proceso no es suficiente. En este grupo se encuentra la leche, lo que justifica el uso de criterios conservadores de esterilización. En el modelo desarrollado se utilizan las esporas de *Clostridium botulinum* como objetivo microbiológico de referencia, debido a su elevada resistencia térmica, su relevancia histórica, y el riesgo asociado a la toxina botulínica.

El criterio 12D consiste en reducir la población objetivo en doce ciclos decimales. Esto significa disminuir la carga en un factor de 10^{12} respecto de la población inicial considerada. Aunque el número exacto de microorganismos iniciales puede variar, el criterio 12D se utiliza como una referencia conservadora para diseñar tratamientos térmicos de baja acidez (Holdsworth & Simpson, 2016). En el laboratorio virtual, este criterio se traduce en un valor F0 objetivo que actúa como restricción de diseño del tubo de retención.

El enfoque basado en F0 permite comparar tratamientos con temperaturas y tiempos distintos. Dos procesos pueden tener tiempos de residencia muy diferentes y, sin embargo, producir efectos equivalentes si la temperatura también cambia. Esta equivalencia es la base del diseño térmico moderno, ya que permite estudiar configuraciones de alta temperatura y corto tiempo, como UHT, y contrastarlas con tratamientos de menor temperatura y mayor duración.

2.3. Relevancia industrial del procesamiento UHT

El procesamiento UHT se utiliza ampliamente en la industria láctea porque permite obtener productos estables durante períodos prolongados, siempre que se mantenga la integridad aséptica posterior al tratamiento. A diferencia de la pasteurización, cuyo objetivo es reducir

patógenos vegetativos y extender parcialmente la vida útil bajo refrigeración, el UHT busca alcanzar una condición de esterilidad comercial que permita almacenamiento a temperatura ambiente.

La configuración indirecta se caracteriza por transferir calor a través de una superficie, sin contacto directo entre producto y servicio térmico. Esto implica el uso de intercambiadores de placas o tubulares. En el caso de leche y alimentos líquidos de baja a media viscosidad, los intercambiadores de placas pueden ser adecuados por su alta área específica, diseño compacto y buena transferencia de calor. Sin embargo, también deben analizarse riesgos como ensuciamiento, caída de presión y limpieza.

El tren UHT indirecto incorpora regeneración térmica para mejorar la eficiencia energética. La corriente caliente que sale del tubo de retención transfiere calor a la alimentación fría, reduciendo la energía necesaria en el calentador final. Esta recuperación es ventajosa desde el punto de vista de consumo de vapor y agua, pero modifica la historia térmica del producto. Por eso, en el modelo no se considera la regeneración solo como una etapa energética, sino también como una etapa que puede contribuir a letalidad y deterioro de calidad.

En términos de diseño, el UHT no puede analizarse solo por su temperatura de salida. También se debe considerar la rapidez del calentamiento, el tiempo de residencia en el equipo, el perfil de temperatura, la retención posterior y el enfriamiento. La memoria aborda este problema integrando datos de EDR con cálculos externos, permitiendo transformar la geometría y los perfiles térmicos en indicadores de desempeño alimentario.

2.4. Laboratorios virtuales en ingeniería de alimentos

Un laboratorio virtual es una herramienta computacional que reproduce de manera controlada el comportamiento de un proceso, permitiendo ensayar condiciones, observar variables y obtener resultados sin operar un equipo físico. En ingeniería de alimentos, este enfoque resulta especialmente útil cuando los procesos involucran riesgos sanitarios, altos costos de operación o condiciones difíciles de modificar experimentalmente. Un tren UHT es un buen ejemplo, ya que combina altas temperaturas, requerimientos de asepsia y variables críticas de seguridad.

El valor pedagógico del laboratorio virtual no radica solamente en mostrar una simulación atractiva, sino en permitir la experimentación guiada. Un estudiante o usuario puede modificar la temperatura objetivo, el caudal, el diámetro del tubo o el parámetro de calidad y observar el efecto resultante en F0, calidad retenida, consumo de vapor y largo requerido. Esta interacción facilita comprender relaciones causa-efecto que, en un laboratorio físico, podrían requerir múltiples ensayos costosos.

La construcción de un laboratorio virtual exige trazabilidad. Cada resultado debe poder relacionarse con una ecuación, una variable importada, un supuesto o un perfil obtenido desde el simulador. En este trabajo, la trazabilidad se logra mediante la arquitectura Aspen Plus-EDR-Calculator-Excel. Esta arquitectura separa claramente qué calcula Aspen, qué entrega EDR, qué variables extrae Calculator y qué integraciones ejecuta Excel.

La herramienta también permite discutir limitaciones del modelo. Por ejemplo, el resultado de calidad depende de los parámetros cinéticos elegidos; el perfil de velocidad depende del comportamiento reológico supuesto; el F0 calculado depende de los parámetros térmicos del microorganismo patrón; y el diseño EDR depende de las especificaciones de intercambiador. Hacer visibles estas dependencias fortalece el aprendizaje, porque evita tratar la simulación como una caja negra.

3. CAPÍTULO III. FENOMENOLOGÍA DEL PROCESO UHT

3.1. Cinética térmica de inactivación

La base fenomenológica del tratamiento térmico es que la inactivación microbiana depende simultáneamente de la temperatura y del tiempo. En condiciones isotermas, suele modelarse como una cinética de primer orden, donde la velocidad de destrucción es proporcional a la población remanente. Este supuesto no describe todos los comportamientos microbiológicos posibles, pero ofrece una herramienta práctica ampliamente utilizada para diseño térmico, especialmente cuando se trabaja con parámetros D y z.

La ecuación diferencial básica puede escribirse como:

$$\frac{dN}{dt} = -k(T)N \quad (1)$$

Donde N es la población microbiana y k(T) es una constante dependiente de la temperatura. Al integrar esta ecuación bajo temperatura constante, se obtiene una relación exponencial entre población y tiempo.

$$N(t) = N_0 e^{-k(T)t} \quad (2)$$

$$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{k(T)}{\ln(10)}t \quad (3)$$

Al expresarla en base decimal, aparece el concepto de reducción logarítmica, que es más útil en tecnología de alimentos porque los tratamientos suelen especificarse en ciclos decimales.

El tiempo decimal D(T) representa el tiempo necesario para reducir la población en un 90 %, es decir, un ciclo logarítmico, a una temperatura dada. Un valor D alto indica mayor resistencia térmica, mientras que un valor D bajo indica que la inactivación ocurre rápidamente. Cada microorganismo tiene valores D distintos según la matriz alimentaria, pH, actividad de agua, composición, presencia de grasa, sales y otros factores protectores o sensibilizantes. Dada la definición se puede expresar D(T) como:

$$D(T) = -\left(\frac{\ln(0,1)}{k(T)}\right) \approx \frac{2,303}{k(T)} \quad (4)$$

Por otro lado, el parámetro z describe cómo cambia D con la temperatura. Específicamente, z corresponde al aumento de temperatura necesario para reducir D en un ciclo logarítmico. Un z pequeño significa alta sensibilidad térmica, lo que se traduce en que un pequeño aumento de temperatura reduce fuertemente el tiempo decimal. Un z grande indica que el microorganismo o atributo es menos sensible al cambio de temperatura. Esta relación permite extrapolar $D(T)$ a partir de un valor de referencia D_{ref} a T_{ref} , ya que si se grafica $\log(D)$ en función de la temperatura se obtienen información importante como se observa en la Figura 1.

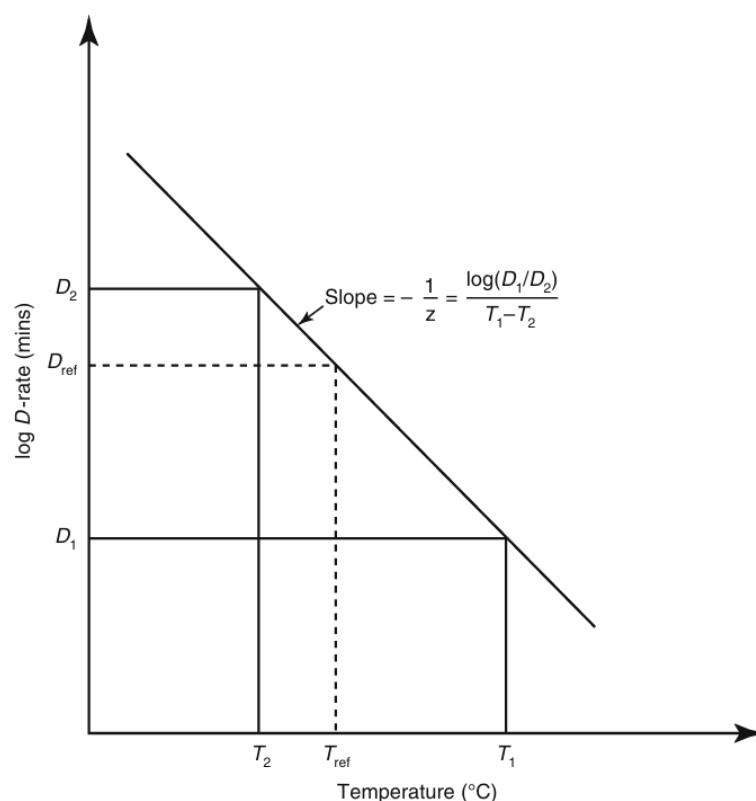


Figura 1. Thermal Death Time curve (TDT)

Fuente: (Holdsworth & Simpson, 2016)

Se puede observar, como se definió anteriormente, que entre D_1 y D_2 existe un ciclo logarítmico, y la temperatura necesaria para reducir un ciclo logarítmico es $T_2 - T_1$, lo que se define como z . Además, si consideramos un D referencia y una T referencia y sacamos la pendiente que ya sabemos que es el inverso de z se obtiene:

$$-\frac{1}{z} = \frac{\log D - \log D_{ref}}{T - T_{ref}} \quad (5)$$

Desarrollando y obteniendo D se llega a la siguiente expresión:

$$D = D_{ref} * 10^{\frac{T_{ref}-T}{z}} \quad (6)$$

Con esta expresión se puede obtener el valor D de un microorganismo o algún atributo del alimento a cualquier temperatura si sabemos los valores de referencia.

3.2. Valor F0 y equivalencia térmica

El valor F0 se utiliza para expresar el efecto térmico acumulado de un proceso como un tiempo equivalente a una temperatura de referencia. Su utilidad radica en que un alimento rara vez experimenta una temperatura estrictamente constante durante todo el proceso. En un tren UHT existen calentamiento, retención, regeneración y enfriamiento. Cada etapa tiene temperaturas diferentes y duraciones distintas. El valor F0 permite integrar toda esa historia térmica en una sola métrica de letalidad equivalente.

Matemáticamente, F0 se calcula como el efecto integrado del sistema, ya que si utilizamos las ecuaciones (1), (4) y (6) nos queda la siguiente expresión:

$$\frac{dN}{N} = -\frac{\ln(10)}{D_{ref}} * 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt \quad (7)$$

Luego podemos integrar la ecuación entre la población inicial y final (N0 y N) y en el tiempo (entre 0 y t) y se obtiene:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\frac{\ln(10)}{D_{ref}} \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt \quad (8)$$

Obteniendo:

$$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{1}{D_{ref}} \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt \quad (9)$$

Si trabajamos la ecuación 9, podemos definir un N final, que puede venir dado de cuantas reducciones decimales queremos llevarle a cabo al microorganismo, por lo tanto, podemos definir N como:

$$N = N_0 * 10^{-X} \quad (10)$$

Donde X son la cantidad de reducciones, estas vienen dadas según la peligrosidad de patógenos que haya en un determinado alimento dependiendo de su acidez u otros parámetros. Para el caso base de leche, el criterio adoptado corresponde a 12 reducciones decimales de la población de esporas de *Clostridium botulinum*.

Desarrollando la ecuación (9):

$$\log\left(\frac{N_0 * 10^{-X}}{N_0}\right) = -\frac{1}{D_{ref}} \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt \quad (11)$$

$$-X * \log(10) = -\frac{1}{D_{ref}} \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt \quad (12)$$

$$X * D_{ref} = \int_0^t 10^{\frac{T(t)-T_{ref}}{z}} dt = F_0 \quad (13)$$

De esta forma queda definido matemáticamente F0, y se puede analizar que cuando la temperatura del producto está por debajo de Tref, la contribución a F0 puede ser pequeña, mientras que cuando está por encima, la contribución crece rápidamente. Por este motivo, las etapas de alta temperatura dominan la letalidad, aunque su duración sea breve. Esta propiedad explica por qué los procesos UHT pueden alcanzar elevada inactivación en pocos segundos.

En el tubo de retención, el modelo asume temperatura aproximadamente constante igual a la temperatura de salida del UHT. Bajo esta condición, la integral se simplifica de la siguiente forma:

$$F_0 = t * 10^{\frac{T_{UHT}-T_{ref}}{z}} \quad (14)$$

Esta expresión permite despejar el tiempo de residencia (t) necesario para cumplir un F0 objetivo. Luego, con el caudal y el diámetro interno, se calcula el largo requerido del tubo.

Esta conexión entre cinética térmica y geometría del equipo es uno de los aportes metodológicos centrales.

En los intercambiadores, la temperatura cambia con la posición y con el tiempo. Por lo tanto, no se puede usar una temperatura única sin perder información importante. En la metodología desarrollada, los perfiles de EDR se discretizan por segmentos. En cada segmento se calcula una contribución de F0 según la temperatura representativa y el tiempo de paso. La suma de esas contribuciones entrega el F0 de la etapa.

3.3. Perfil de velocidad y tiempo de residencia

En flujo continuo, el tiempo de residencia no depende únicamente del volumen total del equipo dividido por el caudal. En una tubería, el perfil de velocidad produce una distribución de tiempos, donde las partículas cercanas al centro se desplazan más rápido y las cercanas a la pared se desplazan más lento. Esta diferencia es relevante tanto para inocuidad como para calidad. Para inocuidad interesa asegurar que incluso la partícula más rápida reciba suficiente tratamiento, para calidad interesa ponderar el efecto sobre todo el flujo.

El perfil de velocidad puede ser descrito de la siguiente forma (Chhabra & Patel, 2025):

$$v(r) = \frac{3s + 1}{s + 1} * \frac{Q}{\pi R^2} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{s+1}{s}} \right] \quad (15)$$

En esta ecuación, Q es el caudal volumétrico, R el radio del tubo, r la posición radial y s un índice de comportamiento del fluido, este índice define si el fluido es newtoniano, no-newtoniano o dilatante. Cada alimento líquido tiene su factor s y están estipulados en la literatura, sin embargo, se puede suponer el peor de los casos donde $s = 1$, ya que nos interesa que la partícula más rápida del perfil quede inocua. Para el cálculo de retención de calidad, la velocidad local se utiliza para determinar el tiempo local $L/v(r)$.

El dimensionamiento del tubo de retención se realiza con criterio conservador, considerando la partícula de menor tiempo de residencia. En el modelo, el largo calculado se exporta a Aspen Plus como variable de proceso. Esto permite que el tubo no sea un dato fijo, sino una consecuencia del caudal, temperatura, densidad, diámetro y criterio F0. Si cambia la temperatura objetivo, el tiempo requerido cambia, si cambia el caudal, la longitud necesaria también cambia.

La incorporación del perfil de velocidad evita simplificar excesivamente el proceso. Si solo se usara una velocidad media, el cálculo de calidad podría subestimar o sobrestimar el deterioro real dependiendo de la sensibilidad térmica del atributo. La integración radial permite ponderar la contribución de cada anillo de flujo, haciendo el cálculo más consistente con la física del transporte en tuberías.

3.4. Deterioro de calidad por temperatura

Los atributos de calidad también pueden describirse mediante cinética térmica. En este contexto, el valor D no representa la destrucción de microorganismos, sino el tiempo necesario para reducir un atributo en un ciclo decimal a cierta temperatura. El atributo puede ser color, pardeamiento, vitamina, aminoácido, proteína o marcador químico. Cada atributo posee su propio Dref, Tref y z, por lo que no todos se deterioran con la misma rapidez ante un mismo tratamiento.

La degradación de calidad es importante porque un proceso microbiológicamente seguro puede ser tecnológicamente deficiente si deteriora en exceso el producto. En leche UHT, el calor puede inducir reacciones de Maillard, formación de lactulosa, furosina, desnaturalización de proteínas del suero, cambios de color, pérdida de vitaminas sensibles y aparición de sabores cocidos (Deeth H. , 2021). Estos cambios dependen de la temperatura, del tiempo y de la composición de la matriz.

El parámetro de pardeamiento o color es especialmente útil para el análisis porque representa un atributo sensible al tratamiento térmico y fácil de interpretar. La retención expresa cuánto del atributo se conserva después del proceso. Un valor cercano a 1 indica baja degradación, mientras que un valor bajo indica daño térmico considerable. En la memoria, la calidad final se calcula como producto de las retenciones por etapa, de modo que se obtiene una retención global del atributo seleccionado.

Para calcular la retención se debe realizar un balance de materia en el tubo por donde pasará el flujo, considerando que el fluido no avanza todo a la misma velocidad. La idea es calcular cuánto atributo de calidad entra y cuánto queda después del tratamiento térmico. A continuación, en la Figura 2 se presenta un esquema para desarrollar el balance:

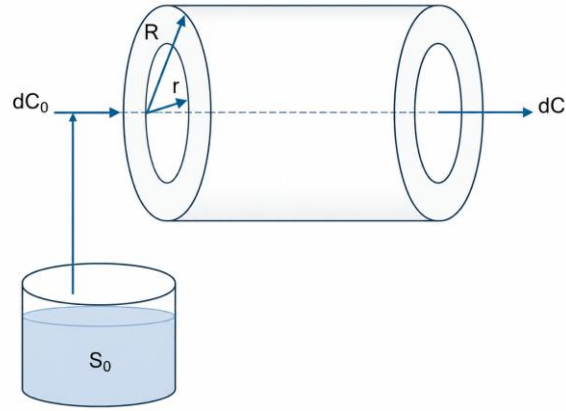


Figura 2. Esquema calidad en tubo.

Se parte dividiendo la sección transversal del tubo en anillos diferenciales. Cada anillo está ubicado a un radio r y tiene espesor dr .

$$dA = 2\pi r dr \quad (16)$$

Como el fluido en ese anillo se mueve con una velocidad local v_r , el caudal volumétrico diferencial que pasa por ese anillo es:

$$dQ = 2\pi r v_r dr \quad (17)$$

Si S_0 es la concentración inicial del atributo de calidad, entonces la cantidad inicial de calidad que entra por ese anillo es:

$$dC_0 = 2\pi r v_r S_0 dr \quad (18)$$

El total de calidad que entra al tubo se obtiene integrando todos los anillos desde el centro hasta la pared:

$$C_0 = \int_0^R 2\pi r v_r S_0 dr \quad (19)$$

$$C_0 = Q * S_0 \quad (20)$$

Luego se considera el deterioro térmico. Para cada anillo, el tiempo de residencia no es igual, porque depende de la velocidad local:

$$t_r = \frac{L}{v_r} \quad (21)$$

Donde L es el largo del tubo y v_r la velocidad local en el radio r. Si el atributo de calidad se degrada con una cinética decimal, la fracción retenida para ese anillo es:

$$dC = dC_0 * 10^{-\frac{t_r}{D(T)}} \quad (22)$$

$$dC = dC_0 * 10^{-\frac{L}{v_r D(T)}} \quad (23)$$

Reemplazando (18) en (23):

$$dC = 2\pi r v_r S_0 * 10^{-\frac{L}{v_r D(T)}} \quad (24)$$

Integrando y dividiendo por la ecuación (20) queda la siguiente expresión para la retención:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{2\pi}{Q} \int_0^R r v(r) * 10^{-\frac{L}{v(r) * D(T)}} * dr \quad (25)$$

Donde la velocidad dependerá del radio y D de la temperatura de exposición. Para el tubo de retención se considerará temperatura constante, por lo tanto, la integral se puede resolver de forma sencilla numéricamente. Por otro lado, en los tubos de los intercambiadores se generará un perfil de temperatura, por lo tanto, se debe integrar además D en el largo del tubo.

Es fundamental aclarar que C/C_0 no representa la calidad total de la leche. La calidad global de un alimento incluye atributos sensoriales, nutricionales, microbiológicos, fisicoquímicos y de aceptación del consumidor. El modelo calcula la retención de un atributo cinético específico. Esta distinción evita una interpretación errónea de los resultados y permite usar el indicador como herramienta comparativa entre condiciones de operación.

3.5. Regeneración térmica y compromiso integrado

La regeneración térmica es una de las etapas más importantes desde el punto de vista energético. Permite utilizar el calor del producto tratado para precalentar la alimentación fría, reduciendo el consumo de vapor en el UHT y el deber de enfriamiento final. En sistemas industriales, una alta regeneración puede representar una mejora significativa en eficiencia

energética. Sin embargo, la regeneración también agrega historia térmica al producto y, por lo tanto, debe analizarse desde inocuidad y calidad.

En la regeneración de entrada, el producto frío aumenta su temperatura hasta una condición previa al UHT. Si las temperaturas se mantienen en rangos moderados, la contribución a F0 puede ser baja, pero el producto ya comienza a experimentar daño térmico acumulativo. En la regeneración de salida, el producto viene desde el tubo de retención y aún se encuentra a temperatura elevada. Esta etapa puede contribuir al deterioro de calidad e incluso a letalidad adicional dependiendo del perfil térmico.

El compromiso integrado puede resumirse así: aumentar la temperatura objetivo puede reducir el largo necesario del tubo y aumentar la inocuidad, pero también acelera el deterioro de calidad y aumenta el consumo de vapor. Aumentar la regeneración puede reducir consumo energético, pero modifica la duración y el nivel de exposición térmica en los intercambiadores. Cambiar el caudal puede afectar la velocidad, la residencia, la caída de presión y el tamaño requerido de equipos.

El laboratorio virtual permite observar este compromiso de manera cuantitativa. En lugar de concluir simplemente que una temperatura mayor es más segura, el modelo permite preguntar cuánto mejora F0, cuánto empeora C/C0, cuánto cambia el vapor requerido y cuánto se modifica el largo del tubo. Esta es la lógica central del análisis de sensibilidad propuesto en el capítulo de resultados.

4. CAPÍTULO IV. MODELACIÓN Y METODOLOGÍA EN ASPEN PLUS V14

4.1. Enfoque general de modelación

La modelación se desarrolló completamente en Aspen Plus V14 en estado estacionario. El simulador se utilizó como plataforma principal para resolver balances de masa y energía, conectar los bloques del proceso y obtener variables necesarias para cálculos externos. El trabajo no se planteó como la simulación aislada de un intercambiador, sino como la construcción progresiva de un laboratorio virtual donde cada etapa del proceso aporta información para indicadores de inocuidad, calidad y energía.

El enfoque de estado estacionario permite consolidar una base robusta de operación. En primer lugar, se definen componentes, método termodinámico y corrientes. Luego se construye el tren UHT, se ajustan especificaciones de temperatura con Design Specs, se dimensionan equipos mediante EDR y se integran cálculos externos. Esta secuencia evita que el modelo dependa de valores manuales desconectados del flowsheet.

La decisión de integrar Excel no responde a una limitación de Aspen como simulador de procesos, sino a la necesidad de ejecutar cálculos específicos de ingeniería de alimentos. La integración radial de calidad, la discretización por segmentos de los perfiles térmicos y el cálculo automático del largo de retención requieren flexibilidad algebraica. Excel permite implementar estas operaciones de forma transparente, modificable y fácilmente verificable.

La metodología tiene una orientación de trazabilidad. Cada resultado debe poder reconstruirse a partir de una variable de Aspen, un dato de EDR, una ecuación cinética o un parámetro definido por el usuario. Esto es importante para una memoria de título porque permite justificar los resultados y, al mismo tiempo, identificar qué cambios serían necesarios para analizar otro alimento líquido o una condición de operación diferente.

4.2. Definición de componentes

La leche constituye una matriz alimentaria compleja formada principalmente por agua, grasa, lactosa, proteínas y minerales, además de vitaminas, enzimas y otros compuestos presentes en menores concentraciones. Desde el punto de vista fisicoquímico, no corresponde a

una solución líquida simple, sino a un sistema disperso en el que coexisten una fase acuosa, glóbulos de grasa emulsionados, proteínas en estado coloidal y sales parcialmente disueltas. Debido a esta complejidad, Aspen Plus no dispone de un único componente capaz de representar directamente la leche y todas sus propiedades estructurales, térmicas y reológicas.

Por esta razón, en el presente trabajo la leche se representó mediante una mezcla simplificada de componentes disponibles en las bases de datos de Aspen Plus. Esta representación no busca reproducir detalladamente la estructura coloidal o bioquímica de la leche real, sino incorporar compuestos representativos de sus fracciones principales: agua, carbohidratos, lípidos, proteínas y minerales. La finalidad de esta simplificación es obtener una corriente con una composición másica coherente y con propiedades suficientemente representativas para resolver los balances de masa y energía, calcular los requerimientos térmicos y desarrollar el dimensionamiento de los equipos de intercambio de calor.

La incorporación de los componentes se realizó desde el entorno Properties de Aspen Plus. Dentro de este entorno se accedió a la sección Components y posteriormente a la pestaña Specifications, donde se define la lista de sustancias que formarán parte de la simulación. Antes de seleccionar los compuestos individuales, fue necesario revisar las bases de datos disponibles mediante la opción Enterprise Database.

A continuación, en la Figura 3 se muestra la pestaña de los componentes.

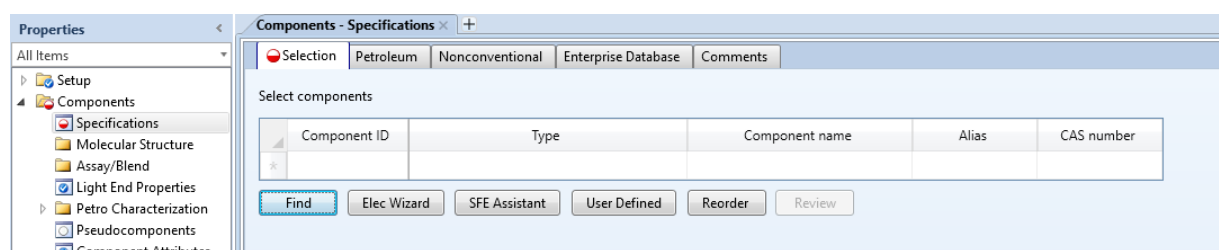


Figura 3. pestaña de componentes.

La sección Enterprise Database contiene las diferentes bibliotecas de componentes incorporadas en Aspen Plus. Estas bases de datos incluyen sustancias utilizadas en distintos tipos de procesos químicos, petroquímicos, energéticos, farmacéuticos y alimentarios. Dependiendo de la base seleccionada, pueden encontrarse compuestos orgánicos, sustancias

inorgánicas, electrolitos, biomoléculas, hidrocarburos, sales y otros componentes con información fisicoquímica asociada.

Para el desarrollo del modelo se habilitaron las bases de datos disponibles, con el propósito de ampliar el número de sustancias accesibles durante la búsqueda. Este procedimiento fue necesario debido a que algunos de los componentes utilizados para representar la leche no se encuentran necesariamente dentro de la biblioteca convencional de compuestos puros, sino que pueden estar incluidos en bases de datos especializadas. La activación de estas bases permite que Aspen Plus consulte un conjunto más amplio de sustancias al momento de realizar la selección. En la Figura 4 se muestra toda la base de datos de componentes agregada

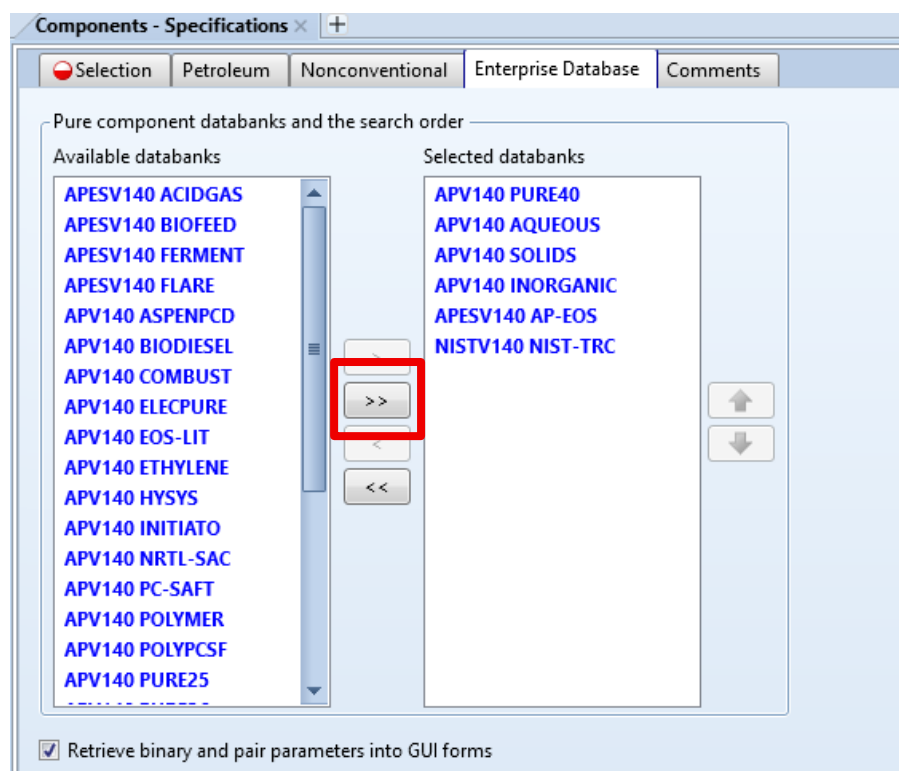


Figura 4. Databanks de componentes

La Figura 4.X mostrará la pestaña Enterprise Database utilizada durante la construcción del modelo. En esta ventana se visualizan las distintas bases de datos disponibles en el programa y con la doble flecha se incorporan todas. La habilitación de estas bibliotecas se realizó antes de incorporar la composición de la leche, con el objetivo de disponer del mayor número posible de alternativas para representar cada fracción de la matriz alimentaria.

Una vez configuradas las bases de datos, se regresó a la sección de selección de componentes y se utilizó la herramienta Find. Esta opción permite localizar sustancias dentro de las bibliotecas de Aspen Plus mediante distintos criterios de búsqueda, como el nombre del componente, parte del nombre, nombre común, fórmula química o identificador disponible en el simulador.

En la pestaña Find se ingresó individualmente el nombre de cada sustancia que se deseaba incorporar. Como resultado, Aspen Plus mostró los componentes disponibles que coincidían con el término introducido, además de sustancias relacionadas, nombres alternativos o compuestos químicamente similares. Esta información permitió comparar las opciones y seleccionar el componente más adecuado para representar cada fracción de la leche.

La Figura 5 muestra la ventana de búsqueda de componentes.

Find Compounds

Compounds | Databanks | PubChem

Search Criteria

☐ Begins with

Name, Alias or CASRN: ☒ Contains

☐ Equals

Compound class:

Molecular weight: From To

Boiling point: From To

Compounds found matching the specified criteria

Compound name	Alias	Databank	Alternate name	MW	BP <C>	CAS number	Compound class
D-(+)-LACTOSE-M	C12H24O12-	NISTV140.I	4-O-BETA-D-(	360,3		64044-51-5	
D-GALACTOSE	C6H12O6-N2	NISTV140.I	(+)-GALACTOS	180,1	357,89	59-23-4	OTHER-POLYFUN
DL-GALACTOSE	C6H12O6-N2	NISTV140.I	(+)-GALACTO	180,1	357,89	26566-61-0	OTHER-POLYFUN
L-(-)-GALACTOSE	C6H12O6-N1	NISTV140.I		180,1	357,89	15572-79-9	OTHER-POLYFUN
LACTOSE	C12H22O11-	NISTV140.I	D-(+)-LACTOSI	342,2	522,461	63-42-3	OTHER-POLYFUN

Matches found: 12 (5 seconds)

Figura 5. Pestaña de selección de componentes.

En esta pestaña se introduce el nombre del compuesto de interés y Aspen Plus despliega los resultados encontrados en las bases de datos habilitadas. Posteriormente, el componente seleccionado se agrega a la lista general de la simulación, donde queda identificado mediante un código o nombre interno empleado por el programa.

Este procedimiento se repitió para cada uno de los componentes utilizados en la representación de la leche. La elección se realizó considerando dos criterios principales. El primero fue la disponibilidad del componente dentro de las bases de datos de Aspen Plus, mientras que el segundo correspondió a su capacidad para representar de manera aproximada una fracción real de la leche. Por lo tanto, algunos compuestos se incorporaron directamente, mientras que otros se emplearon como sustancias representativas o sustitutas de grupos más complejos.

El agua se incorporó mediante el componente WATER, debido a que constituye la fracción mayoritaria de la leche y ejerce una influencia predominante sobre propiedades como la densidad, la capacidad calorífica y la conductividad térmica. Su elevada participación en la mezcla hace que gran parte del comportamiento energético de la corriente esté asociado a las propiedades del agua.

La fracción de carbohidratos se representó mediante M-LACTO, componente utilizado para incorporar la lactosa. La lactosa corresponde al carbohidrato mayoritario de la leche y su inclusión permite aproximar la contribución de los sólidos solubles sobre las propiedades de la mezcla. Su fracción másica se estableció en 0,048, equivalente a un 4,8 % de la composición total.

La fracción lipídica se representó mediante los componentes M-OLEIC y M-N-HEX, cuyas fracciones se combinaron para obtener una proporción total de grasa de 0,038. El uso de más de un compuesto permite aproximar de forma simplificada la diversidad de sustancias que conforman la grasa láctea, la cual está compuesta en la realidad por numerosos triglicéridos y ácidos grasos con diferentes longitudes de cadena y grados de saturación.

La fracción proteica se representó mediante M-GLUTA, utilizado como compuesto representativo de los aminoácidos y estructuras asociadas a las proteínas de la leche. Esta aproximación no reproduce la estructura de las caseínas ni de las proteínas del suero, pero

permite incorporar una fracción orgánica nitrogenada dentro de la corriente. La proporción establecida para esta fracción fue de 0,033, correspondiente a un 3,3 % en masa.

Finalmente, la fracción mineral se representó mediante POTAS y CALCIC, utilizados para incorporar compuestos asociados al potasio y al calcio. Ambos minerales son relevantes en la composición de la leche y su incorporación permite representar de manera aproximada la presencia de sales disueltas. En conjunto, estos componentes corresponden a una fracción másica de 0,006.

La selección adoptada se basa en el enfoque de leche virtual propuesto para la modelación y simulación de procesos lácteos, donde la matriz real se sustituye por una combinación de componentes representativos capaces de reproducir su composición global y ciertas propiedades relevantes para los cálculos de proceso (Munir, Zhang, Yu, Wilson, & Young, 2016).

A continuación se presenta la Tabla 1 con los componentes de la leche

Tabla 1. componentes de leche

Grupo real de la leche	Componentes utilizados en Aspen Plus	Fracción másica del modelo
Agua	WATER	0,875
Grasas	M-OLEIC + M-N-HEX	0,038
Lactosa	M-LACTO	0,048
Proteínas	M-GLUTA	0,033
Minerales	POTAS + CALCIC	0,006
Total	—	1,000

Como se puede observar, el agua representa el 87,5 % de la mezcla, mientras que el 12,5 % restante corresponde a sólidos y compuestos orgánicos representativos. La suma de las fracciones másicas es igual a 1,000, lo que garantiza la consistencia de la composición ingresada en la corriente de alimentación.

La representación mediante componentes sustitutos constituye una aproximación necesaria debido a que Aspen Plus fue desarrollado principalmente para la simulación de procesos químicos y no incluye modelos específicos para describir de manera completa matrices alimentarias coloidales. La leche real presenta fenómenos adicionales, como la dispersión de glóbulos de grasa, la formación de micelas de caseína, la interacción entre proteínas y minerales y la variación de viscosidad con la temperatura. Estos fenómenos no quedan representados explícitamente mediante la mezcla simplificada utilizada.

No obstante, el objetivo principal del modelo no consiste en reproducir todos los fenómenos microscópicos de la leche, sino en disponer de una corriente funcional que permita analizar el comportamiento global del proceso UHT. En este contexto, la composición seleccionada permite estimar propiedades necesarias para calcular los requerimientos de calentamiento y enfriamiento, las temperaturas de las corrientes, los caudales de servicio y las condiciones de operación de los equipos.

La selección de componentes influye directamente en las propiedades calculadas por Aspen Plus. La densidad afecta la conversión entre flujo másico y caudal volumétrico, mientras que este último se utiliza para determinar la velocidad del producto y el tiempo de residencia en el tubo de retención. La capacidad calorífica influye sobre el deber térmico requerido para elevar o reducir la temperatura de la leche. La viscosidad y la conductividad térmica, por su parte, afectan el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor y las caídas de presión obtenidas mediante Aspen EDR.

Por lo anterior, la simplificación de la composición se reconoce como uno de los supuestos relevantes del modelo. Los resultados deben interpretarse considerando que las propiedades de la corriente corresponden a una mezcla equivalente y no a una reproducción exacta de la leche real. A pesar de esta limitación, la representación adoptada se considera apropiada como punto de partida para el desarrollo del laboratorio virtual, debido a que permite vincular la simulación de procesos con los cálculos de inocuidad, calidad y consumo energético.

En trabajos futuros, esta representación podría perfeccionarse mediante la creación de componentes hipotéticos, el ajuste de propiedades experimentales o la incorporación de correlaciones específicas para leche. También sería posible validar la densidad, capacidad

calorífica, viscosidad y conductividad térmica calculadas por Aspen Plus mediante su comparación con datos experimentales o correlaciones reportadas en literatura. De esta forma, se podría mejorar progresivamente la exactitud del modelo sin modificar la estructura general del laboratorio virtual.

4.3. Paquete termodinámico NRTL

Una vez definidos los componentes utilizados para representar la leche, se seleccionó el método termodinámico encargado de calcular las propiedades de la mezcla. Esta configuración se realizó en el entorno Properties de Aspen Plus, ingresando a la pestaña Methods y posteriormente a la sección Global. En esta ventana se seleccionó NRTL como método base para toda la simulación. En la Figura 1 se ve la pestaña de métodos

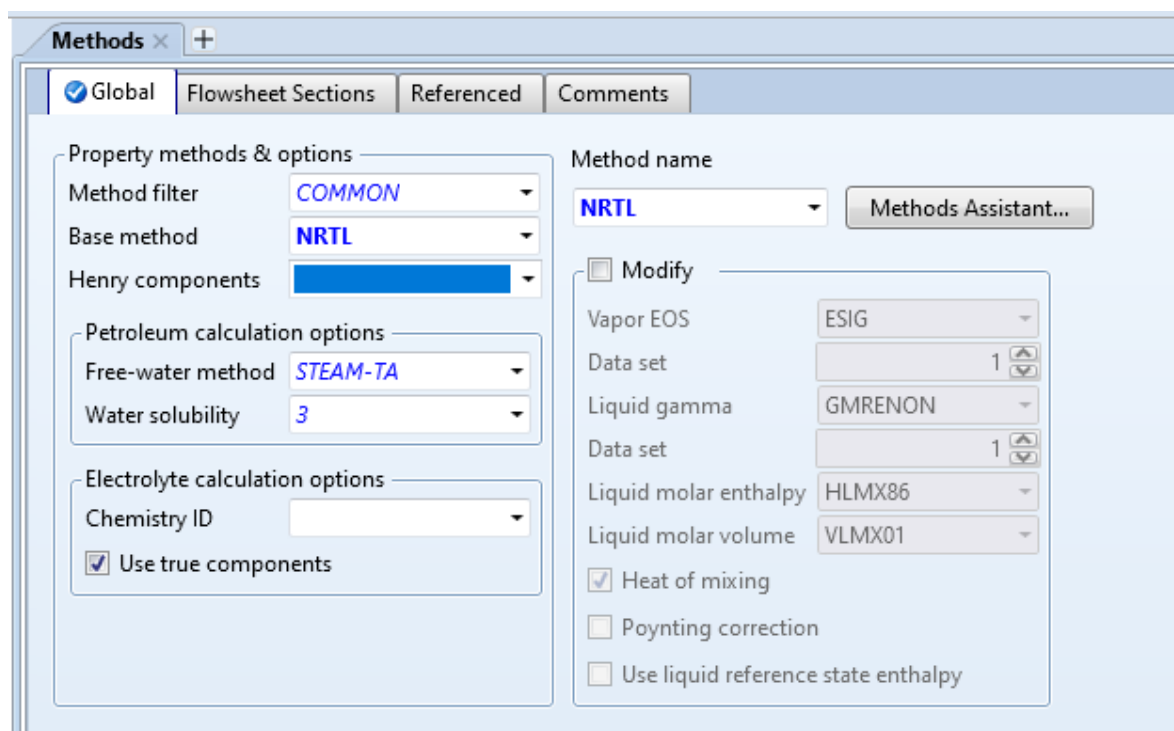


Figura 6. pestaña de elección de método Termodinámico

La elección de NRTL se debe a que la corriente de leche fue representada como una mezcla líquida acuosa formada por componentes de distinta naturaleza química, entre ellos agua, lactosa, compuestos grasos, minerales y un compuesto representativo de la fracción proteica. Debido a estas diferencias, la mezcla puede presentar desviaciones respecto de un

comportamiento ideal, especialmente por las distintas interacciones entre los componentes polares y los componentes de carácter más hidrofóbico.

NRTL es un modelo de coeficientes de actividad utilizado para representar mezclas líquidas no ideales. En el contexto de este trabajo, su función principal es proporcionar propiedades consistentes para el desarrollo de los balances de masa y energía y para la simulación de las distintas etapas del proceso UHT.

El método termodinámico influye directamente en propiedades como la entalpía, la densidad, la capacidad calorífica, la viscosidad y la conductividad térmica de la corriente. Estas propiedades son utilizadas por Aspen Plus para calcular los deberes térmicos de los equipos, las temperaturas de salida y los requerimientos de vapor y agua de servicio. También son utilizadas posteriormente en Aspen EDR para el cálculo de la transferencia de calor y las condiciones hidráulicas de los intercambiadores.

La densidad calculada es especialmente relevante, ya que permite relacionar el flujo másico de leche con el caudal volumétrico. Este último se utiliza para obtener la velocidad del producto y el tiempo de residencia dentro del tubo de retención. Por lo tanto, la selección del método termodinámico también puede influir indirectamente en el largo requerido del tubo y en los cálculos de inocuidad y calidad.

La selección de NRTL no se realizó con el objetivo de estudiar una separación de fases o un equilibrio líquido-vapor complejo. Durante el proceso UHT, la leche se mantiene principalmente en fase líquida y las operaciones corresponden fundamentalmente a etapas de calentamiento, retención y enfriamiento. Por esta razón, el método se utiliza como soporte para calcular las propiedades globales de la corriente y no para representar fenómenos detallados de separación.

NRTL se consideró una alternativa adecuada porque ofrece un equilibrio entre capacidad de representación y facilidad de implementación. El uso de un modelo completamente ideal podría no considerar correctamente las diferencias de interacción entre los componentes, mientras que un modelo más complejo podría requerir información experimental y parámetros que no se encuentran disponibles para todos los compuestos utilizados como sustitutos de las fracciones de la leche.

Debe señalarse que la selección de NRTL no elimina las limitaciones asociadas a la representación simplificada de la leche. El modelo no describe directamente estructuras como las micelas de caseína, los glóbulos de grasa o las interacciones coloidales presentes en la leche real. En consecuencia, las propiedades obtenidas corresponden a una mezcla equivalente construida a partir de componentes disponibles en Aspen Plus.

A pesar de esta limitación, el método seleccionado resulta adecuado para el alcance de la memoria, ya que permite obtener una base consistente para evaluar el comportamiento térmico del proceso, los consumos de servicios auxiliares, el dimensionamiento de los equipos y los cálculos asociados al tubo de retención.

4.4. Construcción del flowsheet

Una vez definidos los componentes de la corriente de leche y seleccionado el método termodinámico NRTL, se inició la construcción del modelo en el entorno Simulation de Aspen Plus. El flowsheet se desarrolló de manera secuencial, comenzando por el sistema de calentamiento UHT, debido a que constituye el equipo principal del proceso y determina la temperatura máxima alcanzada por el alimento.

La temperatura objetivo del caso base se fijó en 145 °C. Sin embargo, alcanzar esta temperatura no garantiza por sí sola la inocuidad del producto, ya que el efecto del tratamiento también depende del tiempo durante el cual la leche permanece a alta temperatura. Por esta razón, la temperatura alcanzada en el UHT se complementa posteriormente con el tubo de retención y con el cálculo de la letalidad acumulada. Las condiciones seleccionadas son consistentes con los tratamientos UHT, los cuales generalmente utilizan temperaturas superiores a 138 °C durante tiempos de pocos segundos.

4.4.1. Construcción inicial del sistema UHT

La construcción comenzó mediante la incorporación de un bloque HEATX, disponible en la Model Palette de Aspen Plus. Esta paleta reúne los bloques correspondientes a operaciones unitarias, corrientes de materia, corrientes de energía y herramientas de conexión que pueden incorporarse al flowsheet. A continuación, en la Figura 7 se muestra la interfaz:

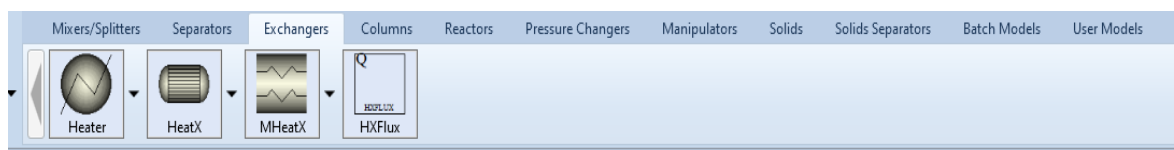


Figura 7. visualización de Exchange en paleta del Flowsheet

En una primera etapa se utilizó el bloque HEATX como un intercambiador de calor convencional, sin establecer todavía una geometría detallada. Esta simplificación permitió definir las condiciones térmicas del proceso, calcular el deber térmico necesario y verificar que el sistema pudiera alcanzar la temperatura objetivo antes de realizar el diseño riguroso del equipo.

El bloque fue arrastrado desde la paleta hasta el área de simulación. Posteriormente, mediante la herramienta Material Stream, se crearon las corrientes de entrada y salida del producto, y las corrientes correspondientes al servicio térmico. De esta manera, el intercambiador quedó compuesto por una corriente fría, correspondiente a la leche, y una corriente caliente utilizada para suministrar la energía requerida.

La corriente de leche se definió inicialmente con las siguientes condiciones:

- Flujo másico: 10.000 kg/h.
- Temperatura de entrada: 70 °C.
- Presión: 5 bar.
- Temperatura objetivo de salida: 145 °C.

La temperatura de entrada de 70 °C representa la condición obtenida después de la etapa de regeneración. La temperatura de salida de 145 °C corresponde a la condición base seleccionada para el tratamiento UHT de la leche.

La presión de 5 bar se adoptó como una condición de modelación para mantener el alimento esterilizado durante el calentamiento y reducir la posibilidad de vaporización al alcanzar temperaturas elevadas. No debe considerarse como una presión óptima universal, debido a que la presión requerida en una instalación real depende de la temperatura, la composición del producto, la caída de presión de los equipos y el margen operacional utilizado.

En los sistemas UHT, el producto debe mantenerse a una presión suficiente para evitar su ebullición durante el calentamiento.

A continuación, en la Figura 8 se muestra la pestaña de diseño del intercambiador.

The screenshot shows the Aspen Plus software interface for the 'B2 (HeatX)' block. The 'Specifications' sub-tab is selected. The 'Model fidelity' section has 'Shortcut' selected. The 'Hot fluid' section has 'Shell' and 'Tube' options. The 'Shortcut flow direction' section has 'Countercurrent' selected. The 'Calculation mode' is set to 'Design'. In the 'Exchanger specification' section, 'Cold stream outlet temperature' is selected as the specification, with a value of 145 C. The 'Exchanger area' is in sqm, and 'Constant UA' is in cal/sec-K. The 'Minimum temperature approach' is 1 C. Buttons for 'Size Exchanger', 'Specify Geometry', and 'Results' are at the bottom.

Figura 8. especificación intercambiador UHT.

Para establecer la temperatura de salida, se accedió a la ventana de configuración del bloque HEATX como se ve en la figura. En la sección de especificaciones se seleccionó como variable operacional la opción “Cold Stream Outlet Temperature”, correspondiente a la temperatura de salida de la corriente fría. Esta variable se fijó en 145 °C, obligando al bloque a calcular el deber térmico necesario para alcanzar dicha condición.

En el lado caliente se incorporó una corriente de vapor como servicio térmico. El vapor se definió a una presión de 5 bar y en condiciones cercanas a saturación. Inicialmente se probaron diferentes caudales de servicio hasta obtener un valor suficiente para alcanzar la temperatura objetivo de la leche. En esta etapa, el ajuste manual del caudal de vapor tuvo como finalidad obtener una primera estimación del servicio térmico y asegurar la convergencia del modelo. Posteriormente, esta variable se vinculó a un bloque Design Spec, encargado de ajustar

automáticamente el flujo de vapor cuando cambian el flujo de leche o la temperatura objetivo. La configuración de este sistema de control se presenta en una sección posterior.

La utilización de vapor saturado se debe a que, durante su condensación, este libera una cantidad importante de energía en forma de calor latente. Además, mientras la presión se mantiene aproximadamente constante, la condensación ocurre a una temperatura cercana a la temperatura de saturación, lo que permite disponer de una fuente térmica estable. En comparación con un servicio que únicamente disminuye su temperatura sin cambiar de fase, el vapor permite transferir una cantidad elevada de energía por unidad de masa.

4.4.2. Conversión del UHT a un intercambiador riguroso de placas

Una vez que el modelo simplificado alcanzó correctamente la temperatura de 145 °C, se procedió a convertir el bloque HEATX en un intercambiador de placas con diseño riguroso.

Para ello, dentro de la configuración del bloque (Figura 8. especificación intercambiador UHT.) se ingresó a la opción Model Fidelity y se seleccionó el modelo Plate. Posteriormente, mediante la opción Convert, el intercambiador simplificado se transformó en un Rigorous Exchanger, habilitando su vinculación con Aspen Exchanger Design and Rating (EDR). A continuación, en la Figura 9 se muestra la pestaña emergente

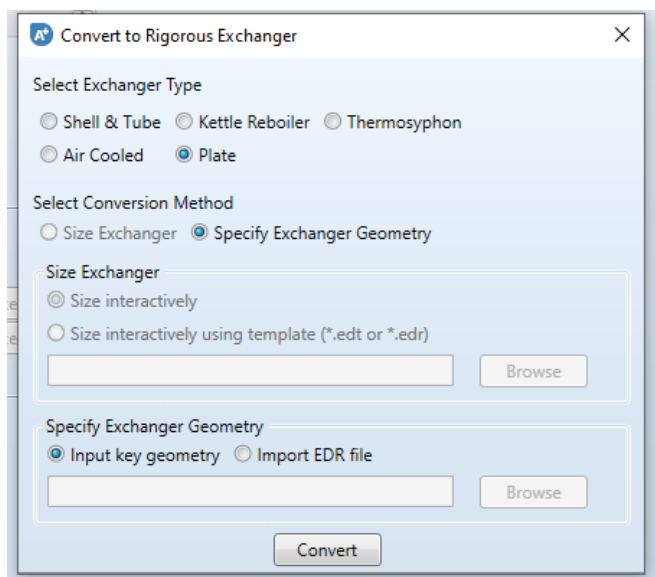


Figura 9. pestaña emergente Rigorous Exchanger

La elección de un intercambiador de placas se relaciona con su aplicación extendida en procesos térmicos de productos lácteos. Estos equipos proporcionan una elevada área de transferencia de calor en un volumen reducido y son utilizados para etapas de calentamiento y enfriamiento en la industria láctea. Los intercambiadores de placas están constituidos por conjuntos de placas de acero inoxidable que forman canales alternados para el producto y el servicio térmico.

Una vez realizada la conversión, se accedió al entorno de diseño mediante la opción Browse EDR. En la pestaña Process Data se revisaron las temperaturas, presiones, caudales y propiedades calculadas por Aspen Plus para ambos lados del intercambiador.

En esta sección también se incorporaron los factores de ensuciamiento o fouling utilizados en el diseño. Estos factores representan la resistencia adicional a la transferencia de calor producida por la acumulación de depósitos sobre las superficies del equipo. Su inclusión es especialmente importante en el tratamiento térmico de leche, debido a que las proteínas y minerales pueden formar depósitos sobre las superficies sometidas a temperaturas elevadas.

En la Figura 10 se muestran los valores utilizados para la configuración.

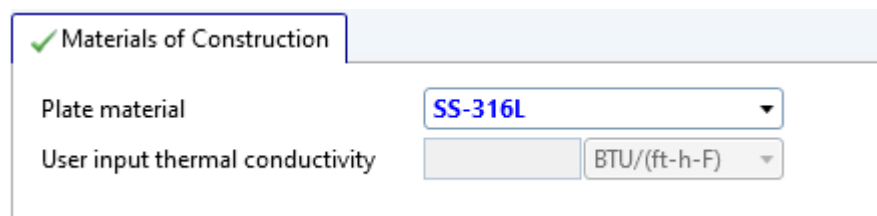
Process Data		Hot Stream (1)		Cold Stream (2)	
Fluid name		vapor	Leche		
		In	Out	In	Out
Mass flow rate (total)	lb/h	6613,9		22361,1	
Temperature	°F	305,45		158	293
Vapor mass fraction		1		0	
Operating pressure (absolute)	bar	5		4,92954	
Heat exchanged	BTU/h				
Adjust if over-specified		Outlet temperature		Outlet temperature	
Estimated pressure drop	bar	0,00174		0,00012	
Allowable pressure drop	bar	0,00174		0,69	
Fouling resistance	m ² -K/W	5E-05		0,0002	

Figura 10. Process Data intercambiador UHT.

La caída de presión no se estableció inicialmente como un valor fijo, sino que se utilizó la calculada por Aspen EDR a partir de la geometría seleccionada, los caudales y las propiedades

de las corrientes. Posteriormente, este resultado fue revisado para comprobar que la presión del producto permaneciera por encima de la necesaria para evitar vaporización y que la pérdida de carga no fuera excesiva.

Como material de construcción se seleccionó **acero inoxidable AISI 316L**, tanto para las superficies en contacto con la leche como para los elementos principales del intercambiador. Este material presenta una elevada resistencia a la corrosión y es ampliamente utilizado en las industrias alimentaria, láctea y de bebidas. Además, su bajo contenido de carbono mejora su comportamiento en uniones soldadas y reduce la susceptibilidad a la corrosión asociada a la soldadura. A continuación se muestra el material seleccionado en la Figura 11



The image shows a software interface for material selection. At the top, there is a tab labeled 'Materials of Construction' with a green checkmark icon. Below this, there are two input fields. The first is labeled 'Plate material' and has a dropdown menu showing 'SS-316L'. The second is labeled 'User input thermal conductivity' and has a dropdown menu showing 'BTU/(ft-h-F)'. The interface is clean and professional, with a light blue and white color scheme.

Figura 11. sección de elección de material.

La utilización de acero inoxidable también facilita la limpieza y permite trabajar con los agentes químicos y temperaturas empleados durante los procedimientos de limpieza en sitio. En la industria alimentaria, el acero inoxidable es el material habitual para las superficies de los intercambiadores que entran en contacto con el producto.

4.4.3. Incorporación del tubo de retención

La corriente de leche que abandona el intercambiador UHT a 145 °C se conectó a un tubo de retención. La función de este elemento es proporcionar el tiempo necesario para que el producto permanezca a la temperatura de tratamiento y alcance la letalidad requerida.

El tubo de retención se incorporó al flowsheet mediante el bloque correspondiente a una tubería. En su configuración se estableció un diámetro interno basado en una dimensión comercial y se seleccionó acero inoxidable como material de construcción, debido a que la superficie se encuentra en contacto directo con el alimento.

En la Figura 12 se puede ver la configuración.

The image shows a software interface for specifying pipe parameters. The 'Pipe Parameters' tab is active. Under 'Fluid flow', the 'Fluid flow' radio button is selected. The 'Length' section has a 'Pipe length' of 2 meter. The 'Diameter' section has 'Inner diameter' at 0,108204 meter, 'Use pipe schedules' selected, and 'Compute using user subroutine' unselected. The 'Pipe schedules' section has 'Material' as STAINLESS, 'Schedule' as 10S, and 'Nom diameter' as 4-IN. The 'Elevation' section has 'Pipe rise' at 0 meter and 'Pipe angle' as deg. The 'Options' section has 'Roughness' at 4,572e-05 meter and 'Erosional velocity coefficient' at 100.

Figura 12. Especificación Tubo de retención.

Durante la construcción inicial del flowsheet se asignó un largo preliminar al tubo, con el propósito de completar las conexiones y permitir la ejecución de la simulación. Sin embargo, este largo no se mantuvo como un parámetro fijo.

En la configuración definitiva, la longitud es calculada mediante los bloques Calculator y la hoja de cálculo vinculada al modelo. El cálculo utiliza el flujo del producto, su densidad, la velocidad dentro de la tubería y la letalidad requerida. De esta manera, el largo se modifica cuando cambian las condiciones de operación o el alimento seleccionado.

El dimensionamiento del tubo debe considerar que la inocuidad no depende únicamente de la temperatura de salida del UHT, sino también del tiempo de residencia. La literatura técnica indica que la longitud y el diámetro del tubo deben relacionarse con la capacidad de procesamiento y con el tiempo de retención requerido. Además, el perfil de velocidad no es completamente uniforme, por lo que el diseño debe asegurar que incluso las fracciones de producto con menor tiempo de residencia reciban un tratamiento suficiente.

4.4.4. Construcción del intercambiador de regeneración

Una vez incorporados el UHT y el tubo de retención, se agregó la etapa de regeneración. Esta sección permite recuperar parte de la energía contenida en la leche caliente que sale del tubo de retención y utilizarla para precalentar la corriente de leche que ingresa al proceso.

Para representar esta operación se incorporó un segundo bloque HEATX. El equipo cuenta con dos circuitos de producto:

- La corriente fría corresponde a la leche que ingresa al proceso a 5 °C.
- La salida de la corriente fría se fijó en 70 °C y se conectó posteriormente a la entrada del UHT.
- La corriente caliente corresponde a la leche tratada que sale del tubo de retención a 145 °C.
- La temperatura de salida de la corriente caliente fue calculada por Aspen Plus.

De esta manera, la leche sin tratar se precalienta utilizando la energía de la leche tratada, mientras que esta última comienza simultáneamente su enfriamiento. La regeneración producto-producto permite reducir tanto el consumo del servicio de calentamiento como la carga del sistema de enfriamiento. Este principio es ampliamente utilizado en procesos lácteos y en sistemas UHT indirectos.

En la ventana de especificaciones del regenerador se seleccionó nuevamente una temperatura de salida como condición de diseño. En este caso se definió la opción Cold Stream Outlet Temperature, estableciendo como objetivo una temperatura de 70 °C para la leche que ingresa al UHT como se ve en la Figura 13.

Exchanger specification

Specification: Cold stream outlet temperature

Value: 70 C

Exchanger area: sqm

Constant UA: cal/sec-K

Minimum temperature approach: 1 C

Buttons: Copy calculated area to input, Copy calculated UA to input, Size Exchanger, Specify Geometry, Results

Figura 13. especificación intercambiador regeneración.

La temperatura de salida de la leche tratada no fue fijada directamente, ya que debía ser calculada a partir del balance energético del intercambiador. Al resolver el caso base, Aspen Plus determinó una temperatura cercana a 88 °C para la corriente caliente que abandona la regeneración.

Para correr la simulación con los dos intercambiadores, en primer lugar, se desactivó temporalmente el bloque UHT. Con la entrada caliente del regenerador establecida en 145 °C y la salida fría definida en 70 °C, se ejecutó el cálculo del regenerador de manera independiente. Esto permitió obtener una primera estimación de la temperatura de salida de la corriente caliente.

Una vez obtenido el valor aproximado de 88 °C, el bloque UHT fue activado nuevamente y se ejecutó la simulación integrada. Este procedimiento permitió proporcionar valores iniciales coherentes y facilitó la convergencia conjunta de ambos intercambiadores.

A continuación, en la Figura 14 se muestra la pestaña de especificación del intercambiador

The screenshot displays the 'Specifications' tab in the Aspen EDR software. The interface is organized into several sections:

- Model fidelity:** Includes radio buttons for 'Shortcut', 'Detailed', 'Shell & Tube' (selected), 'Kettle Reboiler', 'Thermosyphon', 'Air Cooled', and 'Plate'.
- Hot fluid:** Includes radio buttons for 'Shell' and 'Tube' (selected).
- Shortcut flow direction:** Includes radio buttons for 'Countercurrent' (selected), 'Cocurrent', 'Multipass, calculate number of shells', and 'Multipass, shells in series' (with a value of 1).
- Calculation mode:** A dropdown menu set to 'Rating'.
- Exchanger specification:** A section with a dropdown for 'Specification' set to 'Cold stream outlet temperature', a 'Value' field with '70 C', and fields for 'Exchanger area' (sqm), 'Constant UA' (cal/sec-K), and 'Minimum temperature approach' (1 C). There are buttons to 'Copy calculated area to input' and 'Copy calculated UA to input'.
- Buttons:** 'Size Exchanger', 'Specify Geometry', and 'Results' are located at the bottom.

Figura 14. especificación del intercambiador de tubo y coraza en regeneración.

Posteriormente, en la configuración del regenerador se seleccionó el tipo de intercambiador que sería de tubo y coraza, y se estableció que el flujo caliente circulará por los tubos. Con la opción Specify Geometry, se abrió el entorno de Aspen EDR. Donde se diseñó sus dimensiones, distribución de tubos, número de pasos y condiciones térmicas.

En la pestaña Process Data se incorporaron los factores de ensuciamiento correspondientes a las dos corrientes de leche. Al circular producto por ambos lados del intercambiador, el fouling debe considerarse tanto para la corriente fría como para la caliente. Los valores utilizados son los que se muestran en la configuración del modelo.

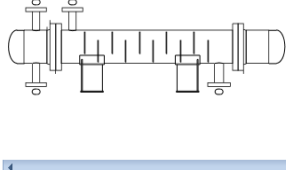
La caída de presión se dejó inicialmente como una variable calculada por Aspen EDR. Al igual que en el UHT, se seleccionó acero inoxidable AISI 316L como material de las superficies en contacto con el producto. A continuación, se muestran las condiciones de diseño definidas.

A continuación se presenta en la Figura 15 y Figura 16 los diseños específicos del intercambiador.

		Hotside	ColdSide	Recent Hotside	Recent ColdSide	Previous Hotside	Previous ColdSide
Calculation mode		Rating / Checking					
Process Conditions							
Mass flow rate	kg/h	10143	10143	10143	10143		
Mass flow rate multiplier		1	1				
Inlet pressure	bar	4,92902	5	4,92902	5		
Outlet pressure	bar	4,72147	4,92919	4,72095	4,92954		
Pressure at liquid surface in column	bar		5				
Inlet Temperature	°C	145	5	145	5		
Outlet Temperature	°C		70	87,45	70		
Inlet vapor mass fraction		0	0	0	0		
Outlet vapor mass fraction		0		0	0		
Heat exchanged	BTU/h			2403724			
Heat exchanged multiplier		1					
Process Input							
Allowable pressure drop	psi	3,77	4,93	3,77	4,93		
Fouling resistance	m ² -K/W	5E-05	0,0003	5E-05	0,0003		
Calculated Results							
Pressure drop	bar			0,20808	0,07046		

Figura 15. Process Data intercambiador de regeneración

		Recent	Previous
Configuration			
TEMA Type	B - E - M	BEM	
Tube layout option	Use existing layout	Use existing layout	
Location of hot fluid	Tube side	Tube side	
Tube OD / Pitch	in 0,75 / 0,9375	0,75 / 0,9375	/
Tube pattern	30-Triangular	30	
Tubes are in baffle window	Yes	Yes	
Baffle type	Single segmental	Single segmental	
Baffle cut orientation	Horizontal	H	
Default exchanger material	SS 316L 9	SS 316L	
Size			
Specify some sizes for Design	Yes		
Shell ID / OD	cm 20,5003 / 21,9075	20,5003 / 21,9075	/
Tube length	cm 120	120	
Baffle spacing center-center (Bc)	cm 9	9	
Number of baffles	10	10	
Number of tubes / Tube passes	34 / 4	34 / 4	/
Shells in series	1	1	
Shells in parallel	1	1	
Overall Results			
Excess surface (%)		-74	
Dp-ratio Shellside / Tubeside		0,2072 / 0,8003	/
Total cost (all shells)	Dollar(US)	13346	



Stream Temperatures vs Distance from End

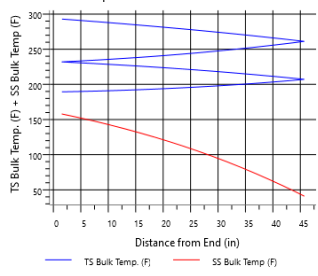


Figura 16. Geometría del intercambiador de regeneración

4.4.5. Incorporación del divisor de flujo

La corriente de leche tratada que sale del regenerador a aproximadamente 88 °C se conectó a un bloque **Splitter**. Este elemento se incorporó para representar la separación entre la

corriente que cumple los requisitos de inocuidad y la corriente que debe enviarse a rechazo o reproceso. En la Figura 17 se observa la paleta con el Split.

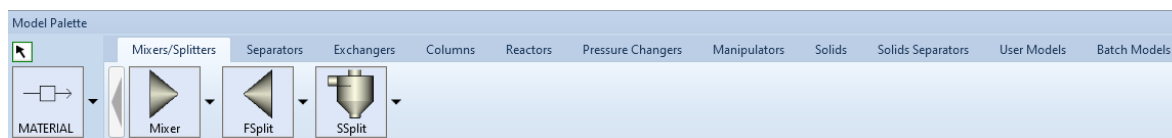


Figura 17. Paleta con Split

En una primera etapa se asignó una división preliminar de 100 % para cada salida (todo el flujo irá a la siguiente etapa: Cooler), únicamente para completar la construcción del flowsheet y comprobar el funcionamiento de las conexiones. Este valor no representa la operación definitiva del proceso.

La primera salida del divisor se conectó al cooler y representa el producto que cumple el tratamiento térmico requerido. La segunda salida representa el producto rechazado, el cual puede dirigirse a reproceso, almacenamiento temporal o eliminación, dependiendo de la estrategia operacional adoptada.

Posteriormente, la distribución del flujo se vincula a una rutina lógica implementada mediante Calculator. Esta rutina debe evaluar el cumplimiento de la condición de inocuidad y modificar la fracción enviada a cada salida. Cuando la condición se cumple, el flujo se dirige al sistema de enfriamiento; cuando no se cumple, se envía a la corriente de rechazo.

La inclusión de esta operación representa el principio de una válvula automática de desviación de flujo. En instalaciones térmicas reales, el producto insuficientemente tratado debe mantenerse separado del producto aceptado. Si no se cumplen la temperatura, el tiempo de retención o las condiciones de presión, la corriente debe desviarse e impedirse su envío a almacenamiento o envasado final.

En el modelo, el Splitter constituye principalmente una representación visual y lógica de este sistema de seguridad. No busca reproducir en detalle la dinámica de una válvula industrial, ya que la simulación se desarrolla en estado estacionario. Su finalidad es mostrar el destino que tendría la leche cuando el cálculo de inocuidad indica que el tratamiento fue insuficiente.

4.4.6. Construcción del sistema de enfriamiento

La corriente aceptada por el Splitter se conectó a un tercer bloque HEATX, utilizado como cooler final. Este equipo fue configurado mediante un procedimiento similar al utilizado para el intercambiador de regeneración.

La corriente caliente corresponde a la leche tratada, que ingresa al cooler a una temperatura aproximada de 88 °C. Como condición base se estableció una temperatura de salida del producto de 20 °C.

La temperatura de 20 °C se seleccionó como condición de diseño del laboratorio virtual y como temperatura previa a un eventual almacenamiento o envasado aséptico. Esta variable puede modificarse posteriormente mediante los bloques Calculator de acuerdo con el alimento analizado o con el objetivo de la simulación. En procesos UHT industriales, el producto tratado puede enfriarse aproximadamente hasta 20 °C antes de su envío al sistema de envasado aséptico.

Como servicio de enfriamiento se utilizó agua a 5 °C. La corriente de agua se conectó al lado frío del intercambiador y su caudal se ajustó inicialmente mediante pruebas sucesivas. Cuando el flujo de servicio era insuficiente, el intercambiador no podía alcanzar la temperatura objetivo y Aspen Plus informaba que el deber térmico solicitado superaba la capacidad disponible del lado frío.

El caudal de agua se incrementó hasta lograr una condición capaz de enfriar el producto hasta 20 °C. Esta iteración manual fue utilizada únicamente durante la construcción inicial. En la configuración final, el flujo de agua se ajusta automáticamente mediante un bloque Design Spec, que modifica el caudal de servicio cuando cambia el flujo de producto o la temperatura objetivo.

En la ventana de especificaciones del cooler se seleccionó la opción Hot Stream Outlet Temperature, ya que en este equipo la leche corresponde a la corriente caliente. La temperatura de salida se fijó en 20 °C.

A continuación, en la Figura 18 se presenta la especificación del intercambiador.

The screenshot shows the 'Specifications' tab of the Aspen EDR interface. The 'Model fidelity' section has 'Shell & Tube' selected. The 'Hot fluid' section has 'Tube' selected. The 'Shortcut flow direction' section has 'Countercurrent' selected, with 'Multipass, shells in series' set to 1. The 'Calculation mode' is set to 'Design'. The 'Exchanger specification' section shows 'Hot stream outlet temperature' as the specification, with a value of 20 C. The 'Exchanger area' is set to 'sqm', and the 'Constant UA' is set to 'cal/sec-K'. The 'Minimum temperature approach' is set to 1 C. At the bottom, there are buttons for 'Size Exchanger', 'Specify Geometry', and 'Results'.

Figura 18. Especificación del intercambiador de refrigeración.

El cooler se configuró como un intercambiador de tubos y coraza. Luego se seleccionó la opción Specify Geometry para acceder al EDR Browser y realizar el diseño riguroso del equipo.

En EDR se revisaron las condiciones térmicas e hidráulicas, se incorporaron los factores de ensuciamiento y se seleccionó acero inoxidable AISI 316L para las superficies en contacto con la leche. La caída de presión fue determinada por Aspen a partir del diseño calculado. A continuación, se muestra la interfaz de los resultados del EDR.

En la Figura 19 y Figura 20 se observa el diseño específico del intercambiador.

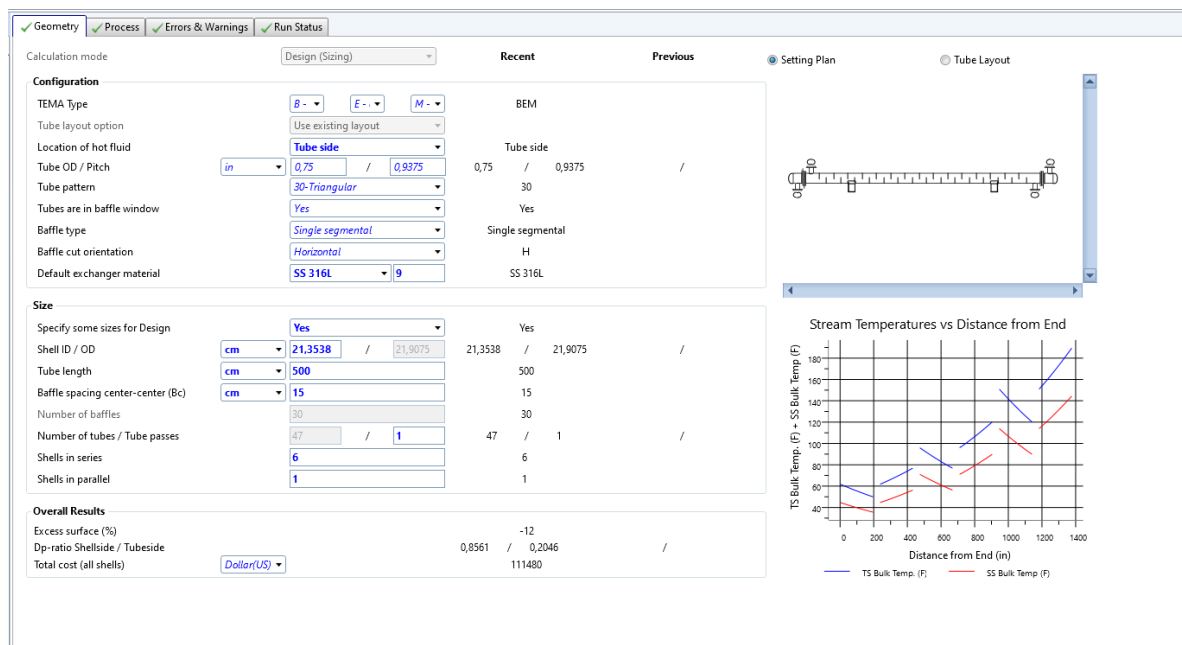


Figura 19. Geometría del intercambiador de refrigeración

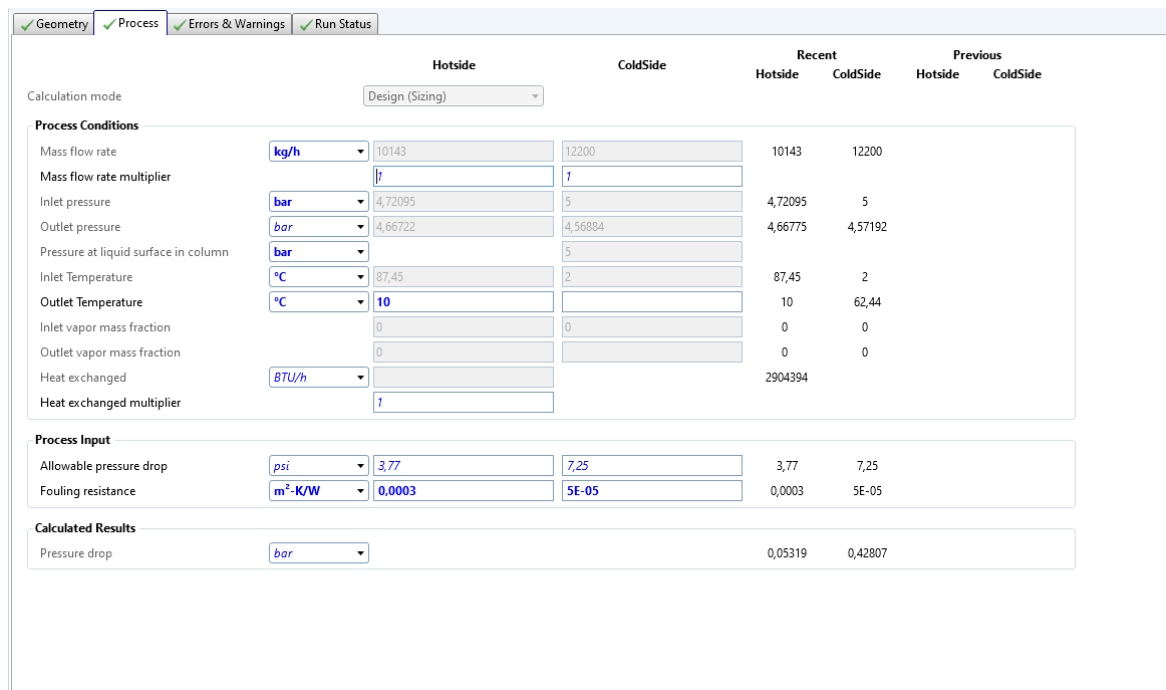


Figura 20. Process Data del intercambiador de refrigeración.

4.4.7. Flowsheet completo

La leche ingresa al sistema a 5 °C y es precalentada hasta 70 °C mediante recuperación de calor. Posteriormente, el intercambiador UHT eleva su temperatura hasta 145 °C. El producto permanece a alta temperatura dentro del tubo de retención y luego vuelve al regenerador, donde

El flowsheet construido constituye la base del laboratorio virtual. Sobre este modelo se incorporaron posteriormente los bloques Design Spec y Calculator encargados de controlar los servicios térmicos, calcular el largo del tubo de retención y evaluar la inocuidad y la calidad del producto. A continuación, en la Figura 21 se presenta el flowsheet:



Los bloques Design Spec de Aspen Plus se utilizaron para ajustar automáticamente los caudales de los servicios auxiliares necesarios para cumplir las temperaturas objetivo del proceso. Su incorporación permite que la simulación responda de manera automática frente a

cambios en el caudal de leche, en las condiciones de entrada o en las temperaturas establecidas, evitando tener que modificar manualmente los flujos de vapor y agua de enfriamiento.

En el modelo se configuraron dos Design Specs: uno para controlar el caudal de vapor utilizado en el intercambiador UHT y otro para ajustar el caudal de agua de enfriamiento del cooler. En ambos casos, la configuración se realizó mediante las pestañas Define, Spec y Vary.

4.5.1. Design Spec para el servicio de vapor del UHT

El primer Design Spec se implementó para asegurar que la leche alcance la temperatura objetivo a la salida del intercambiador de placas. Para ello, en la pestaña Define se incorporaron las variables de temperatura necesarias para realizar la comparación. A continuación, en la Figura 22 se muestra la pestaña de design specs

The screenshot shows the 'Define' tab of the Design Spec configuration window. At the top, there are tabs for Define, Spec, Vary, Fortran, Declarations, EO Options, and Comments. The 'Active' checkbox is checked. Below it, a section titled 'Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)' contains a table with two rows:

Variable	Definition
VAP	Block-Var Block=UHT Variable=COLD-TEMP Sentence=STREAM-PROP Units=C
TEMPOBJ	Block-Var Block=UHT Variable=T-COLD Sentence=PARAM Units=C

Below the table are buttons for New, Delete, Copy, Paste, Move Up, Move Down, and View Variables. The 'Edit selected variable' section shows the variable 'TEMPOBJ' selected. On the left, a 'Category' list includes All, Blocks (selected), Streams, Model Utility, Property Parameters, and Reactions. On the right, the 'Reference' section shows the following configuration:

- Type: Block-Var
- Block: UHT
- Variable: T-COLD
- Sentence: PARAM
- Units: C

At the bottom, there is an 'EO input' section with fields for 'Open variable' and 'Description'.

Figura 22. Design spec vapor UHT

La primera variable, denominada VAP, corresponde a la temperatura real de la corriente de leche a la salida del intercambiador UHT. Esta variable es obtenida directamente desde la corriente de proceso calculada por Aspen Plus. La segunda variable, denominada TEMP-OBJ, representa la temperatura objetivo definida para el tratamiento térmico, cuyo valor para el caso base corresponde a 145 °C.

Posteriormente, en la pestaña Spec, se estableció que la temperatura real de salida del producto debía ser igual a la temperatura objetivo. De esta forma, Aspen Plus evalúa durante cada iteración la diferencia entre ambas variables y modifica la variable manipulada hasta que la especificación se cumple. En la Figura 23 se muestra la pestaña “spec”.



Figura 23. Especificaciones Design spec UHT.

Esta configuración asegura que la corriente de leche alcance la temperatura definida para el proceso, incluso cuando se modifiquen otras condiciones operacionales. Por ejemplo, si aumenta el caudal de leche o se establece una temperatura UHT mayor, también aumentará la cantidad de energía requerida por el intercambiador.

En la pestaña Vary se seleccionó como variable manipulada el flujo másico de la corriente de vapor utilizada como servicio térmico del intercambiador. Para facilitar la convergencia del modelo, se definió un intervalo de variación comprendido entre 2.000 y 3.000 kg/h. En la Figura 24 se muestra la pestaña “vary”.

The screenshot shows the 'Vary' tab in Aspen Plus. The 'Manipulated variable' section is configured with the following values:

- Type: Stream-Var
- Stream: 1
- Substream: MIXED
- Variable: MASS-FLOW
- Units: kg/hr

The 'Manipulated variable limits' section is configured with the following values:

- Lower: 2000
- Upper: 3000
- Step size: (empty)
- Maximum step size: (empty)

The 'Report labels' section has four empty boxes for Line 1, Line 2, Line 3, and Line 4.

The 'EO input' section has an 'Open variable' box and a 'Description' box.

At the bottom of the window are three buttons: Copy, Paste, and Clear.

Figura 24. Especificación flujo variable de vapor.

Este intervalo se determinó a partir de pruebas preliminares realizadas para diferentes temperaturas de operación, en las cuales los caudales de vapor necesarios se encontraron dentro de este rango. Durante la ejecución de la simulación, Aspen Plus modifica el flujo de vapor dentro de los límites establecidos hasta que la temperatura de salida de la leche coincide con la temperatura objetivo.

De esta manera, el caudal de vapor deja de ser un dato fijado manualmente y pasa a ser un resultado calculado por la simulación. Cuando cambia el flujo de leche, la temperatura de entrada o la temperatura objetivo del UHT, el Design Spec determina automáticamente el nuevo requerimiento de vapor.

Este procedimiento es especialmente útil para el análisis de sensibilidad, ya que permite comparar distintas condiciones de operación manteniendo el mismo criterio térmico de salida. Además, permite cuantificar cómo aumenta o disminuye el consumo de vapor frente a modificaciones en las condiciones del proceso.

4.5.2. Design Spec para el servicio de agua del cooler

El segundo Design Spec se configuró para controlar la temperatura final de la leche a la salida del cooler. El procedimiento utilizado fue similar al aplicado en el intercambiador UHT, pero en este caso la variable manipulada corresponde al flujo de agua de enfriamiento.

En la Figura 25 se observa la pestaña define.

The screenshot displays the 'Define' tab of a software interface. At the top, there are tabs for 'Define', 'Spec', 'Vary', 'Fortran', 'Declarations', 'EO Options', and 'Comments'. The 'Define' tab is active, indicated by a checkmark. Below the tabs, there is a section for 'Active' with a checked checkbox. A heading 'Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)' is followed by a table with two columns: 'Variable' and 'Definition'.

Variable	Definition
TEMP	Block-Var Block=COOLER Variable=HOT-TEMP Sentence=STREAM-PROP Units=C
TOBJ	Block-Var Block=COOLER Variable=T-HOT Sentence=PARAM Units=C
*	

Below the table are buttons for 'New', 'Delete', 'Copy', 'Paste', 'Move Up', 'Move Down', and 'View Variables'. Below these buttons is a section for 'Edit selected variable'. It includes a 'Variable' dropdown menu with 'TOBJ' selected. To the left of the 'Reference' section are radio buttons for 'Category' with options: 'All', 'Blocks' (selected), 'Streams', 'Model Utility', 'Property Parameters', and 'Reactions'. The 'Reference' section contains dropdown menus for 'Type' (Block-Var), 'Block' (COOLER), 'Variable' (T-HOT), 'Sentence' (PARAM), and 'Units' (C). At the bottom, there is an 'EO input' section with fields for 'Open variable' and 'Description'.

Figura 25. Design spec flujo de agua refrigeración.

En la pestaña Define se incorporó una variable asociada a la temperatura real de la corriente de leche a la salida del cooler y una segunda variable correspondiente a la temperatura final objetivo. Para el caso base, esta temperatura se estableció en 20 °C.

A continuación, en la Figura 26 se presenta la pestaña de “spec”.

Design specification expressions	
Spec	TEMP
Target	TOBJ
Tolerance	0.01

Figura 26. especificación Design spec refrigeración.

En la pestaña Spec se indicó que la temperatura calculada a la salida del cooler debía coincidir con la temperatura objetivo definida para el producto. Aspen Plus utiliza esta condición como criterio de convergencia para el ajuste del servicio de enfriamiento.

A continuación, en la Figura 27 se muestra la pestaña “vary”

Manipulated variable	
Type	Stream-Var
Stream:	11
Substream:	MIXED
Variable:	MASS-FLOW
Units:	kg/hr

Manipulated variable limits	
Lower	5000
Upper	25000
Step size	
Maximum step size	

Report labels			
Line 1	Line 2	Line 3	Line 4

EO input	
Open variable	
Description	

Copy Paste Clear

Figura 27. Especificación flujo variable de agua.

Finalmente, en la pestaña Vary se seleccionó como variable manipulada el flujo másico de la corriente de agua de enfriamiento. Durante la simulación, este caudal es modificado automáticamente hasta que la leche alcanza la temperatura final especificada.

La utilización de este Design Spec permite que el sistema de enfriamiento se adapte a los cambios producidos en las etapas anteriores. Por ejemplo, si la leche ingresa al cooler a una temperatura mayor o aumenta el caudal de producto, Aspen Plus incrementa el flujo de agua requerido para mantener la temperatura final. De manera equivalente, si disminuye la carga térmica, el caudal del servicio también se reduce.

La incorporación de ambos Design Specs permite automatizar los principales servicios auxiliares del proceso. El flujo de vapor se ajusta para cumplir la temperatura objetivo del UHT, mientras que el flujo de agua se modifica para alcanzar la temperatura final del producto. Con ello, el laboratorio virtual puede analizar diferentes escenarios de operación sin tener que recalcular manualmente los servicios para cada caso.

4.6. Diseño con Aspen EDR

Una vez construido el flowsheet en Aspen Plus, los intercambiadores de calor fueron diseñados utilizando Aspen Exchanger Design and Rating (EDR), herramienta que permite transformar un intercambiador simplificado en un equipo con características geométricas y operacionales representativas de un diseño industrial. Para ello, Aspen EDR requiere la definición de las condiciones de operación del proceso, tales como caudales, temperaturas de entrada y salida, presiones de operación, factores de ensuciamiento (fouling) y material de construcción, además de las propiedades de las corrientes obtenidas desde Aspen Plus.

En todos los intercambiadores se seleccionó acero inoxidable AISI 316L como material de construcción, debido a que es uno de los materiales más utilizados en la industria alimentaria por su elevada resistencia a la corrosión, facilidad de limpieza y compatibilidad con procesos de limpieza y sanitización (CIP), además de cumplir los requisitos higiénicos exigidos para equipos en contacto con alimentos.

4.6.1. Diseño del intercambiador UHT

El primer equipo diseñado fue el intercambiador de placas correspondiente al UHT, debido a que constituye el equipo principal del proceso y determina el requerimiento energético del sistema. A partir de las condiciones de operación obtenidas previamente en Aspen Plus, se definieron el material de construcción, el factor de ensuciamiento, las presiones de operación y las condiciones de las corrientes de proceso y de servicio.

Con esta información, Aspen EDR realizó automáticamente el dimensionamiento del equipo, entregando parámetros como el número de placas, área efectiva de transferencia de calor, dimensiones características, coeficientes globales de transferencia, velocidades, caídas de presión y demás especificaciones constructivas necesarias para su diseño.

A continuación, en la Figura 28 se presenta la geometría definida por Aspen EDR para el intercambiador de placas:

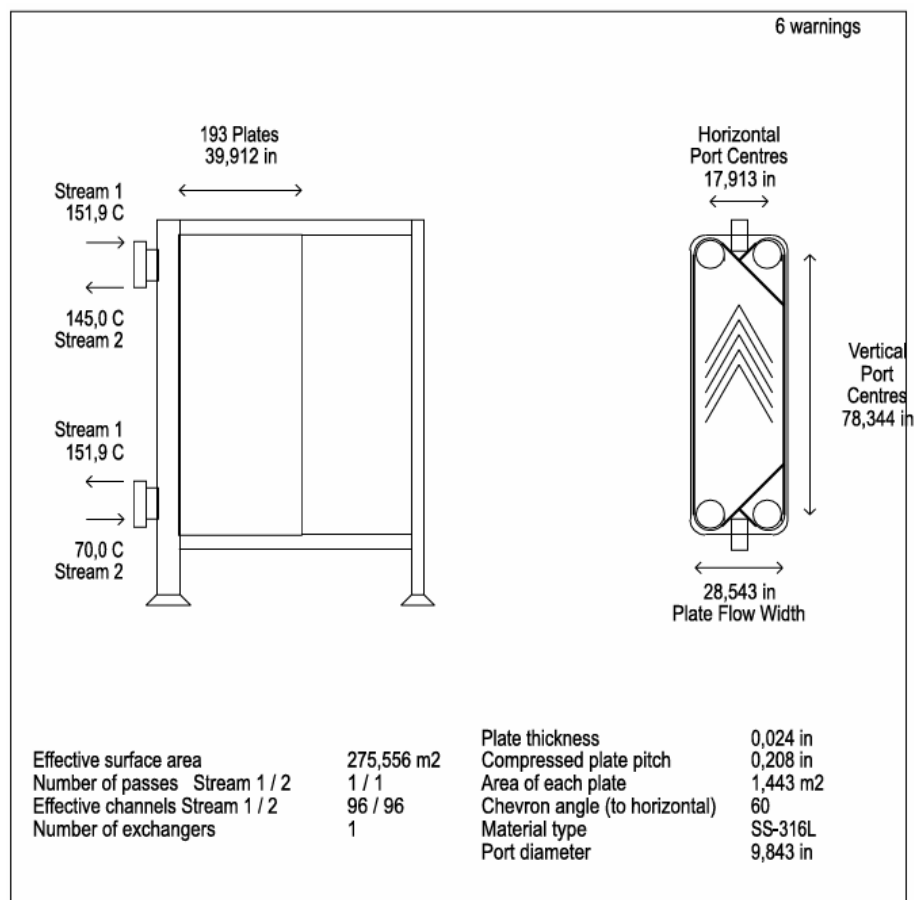


Figura 28. Geometría del intercambiador de placas.

Si bien Aspen EDR permite obtener el perfil de temperatura a lo largo del intercambiador, este no se utilizó posteriormente en los cálculos de inocuidad y calidad. Esto ocurre ya que, debido a la elevada eficiencia de transferencia de calor de los intercambiadores de placas, el incremento de temperatura ocurre en un tiempo muy corto, por lo que el tratamiento térmico efectivo se considera concentrado en el tubo de retención, donde se produce

prácticamente la totalidad de la letalidad microbiológica y del deterioro de calidad considerado en este trabajo.

Adicionalmente, Aspen EDR incorpora una herramienta de estimación de costos, mediante la cual es posible obtener valores referenciales asociados a la fabricación, instalación y operación del intercambiador, proporcionando información complementaria para futuros análisis técnico-económicos.

4.6.2. Diseño del regenerador

Posteriormente se diseñó el intercambiador de regeneración, modelado como un intercambiador de tubo y coraza, en el cual la corriente caliente circula por el lado de los tubos mientras que la corriente fría circula por la coraza. Al igual que en el UHT, se definieron las condiciones de operación, el material de construcción, el factor de ensuciamiento y las presiones de trabajo, siendo Aspen EDR el encargado de completar el diseño mecánico del equipo.

El diseño generado proporciona información detallada sobre la geometría del intercambiador, incluyendo longitud de tubos, diámetro interno y externo, número de tubos, diámetro de la coraza, disposición interna, área de transferencia de calor y caídas de presión, entre otros parámetros relevantes para el análisis del equipo.

En la Figura 29 y Figura 30 se observa cómo queda la geometría del intercambiador de regeneración.

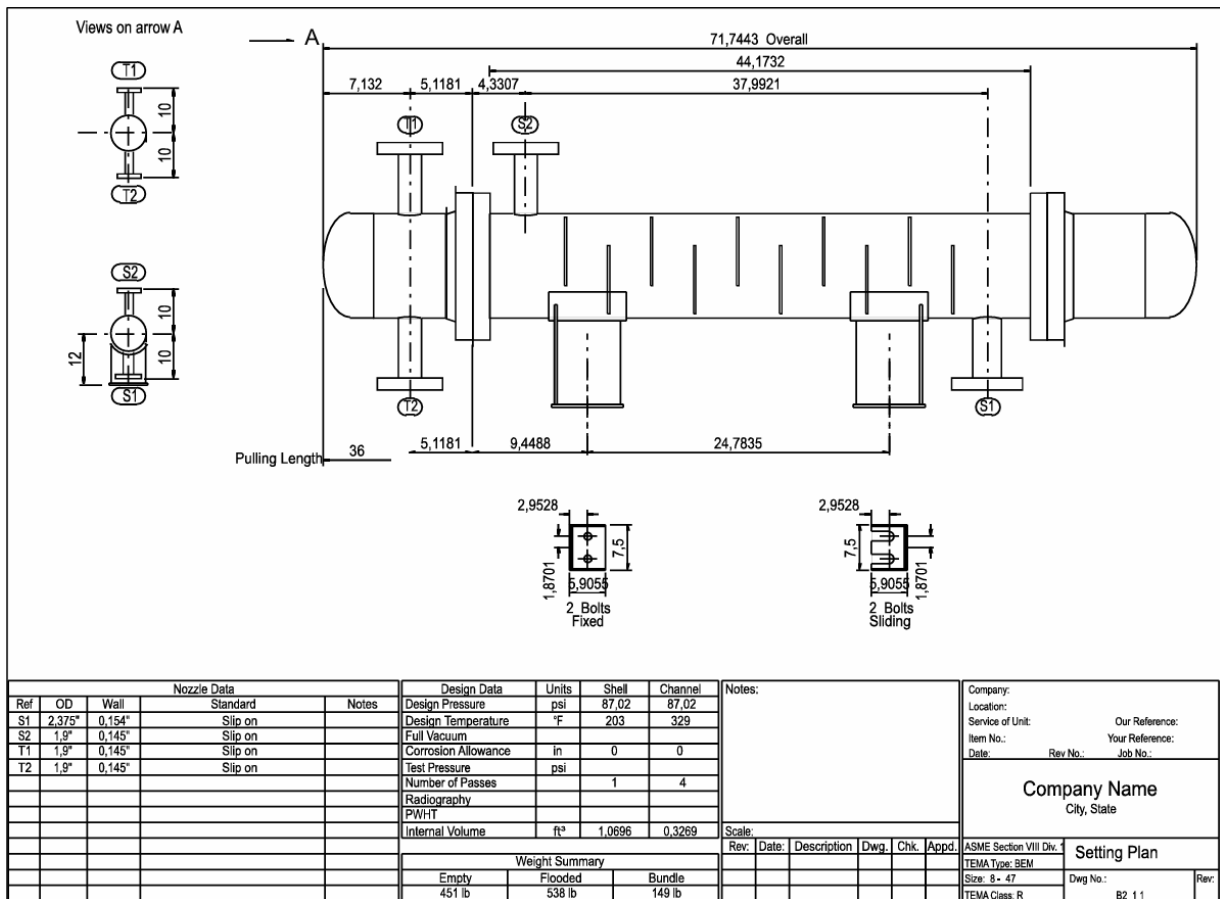


Figura 29. Geometría coraza intercambiador de regeneración

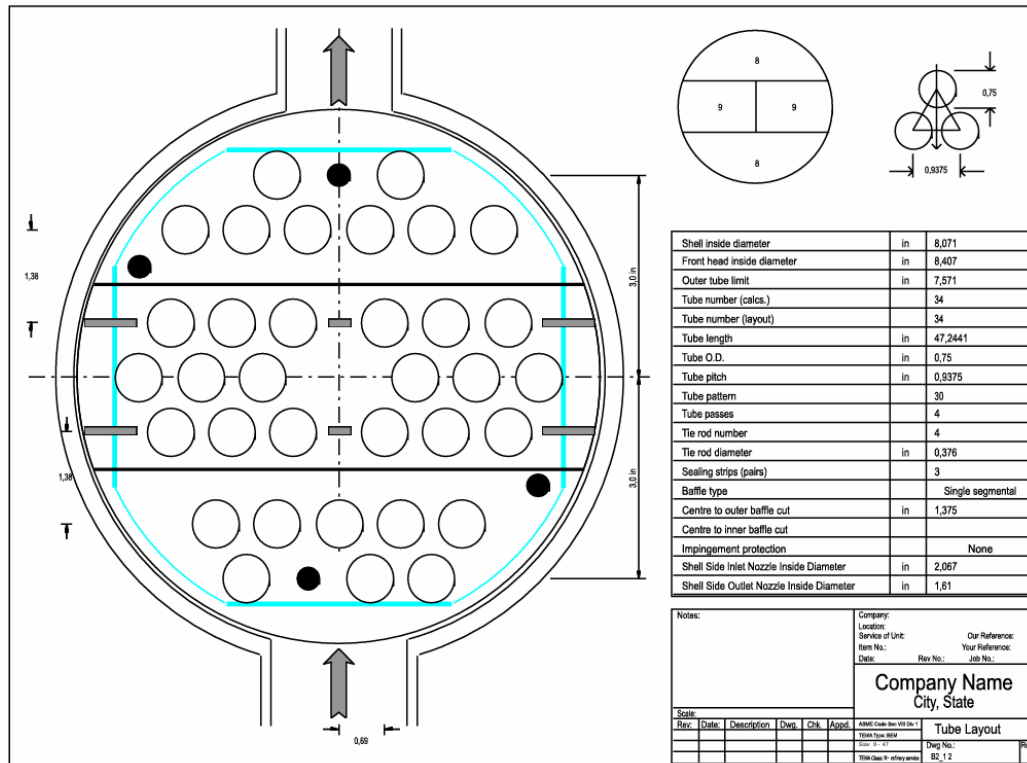


Figura 30. Geometría Tubos intercambiador de regeneración

A diferencia del intercambiador UHT, en este equipo el perfil de temperatura constituye una variable fundamental para el desarrollo del laboratorio virtual. Aspen EDR entrega la distribución de temperatura tanto de la corriente que circula por los tubos como de la corriente que circula por la coraza a lo largo del equipo. Estos perfiles son posteriormente exportados y utilizados para realizar el cálculo segmentado de los indicadores de inocuidad y calidad, permitiendo evaluar el efecto del historial térmico durante la regeneración. A continuación, en la Figura 31 se muestra el perfil de temperatura:

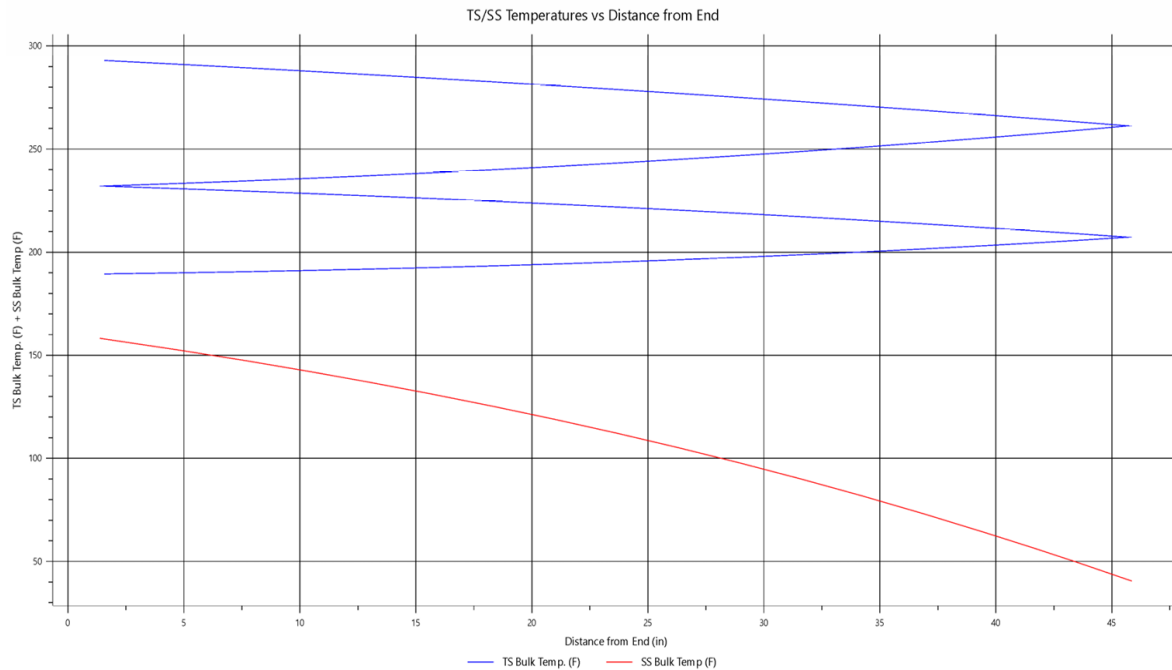


Figura 31. Perfil de temperatura intercambiador de regeneración

4.6.3. Diseño del cooler

Finalmente se diseñó el intercambiador de enfriamiento (cooler) siguiendo el mismo procedimiento empleado para el regenerador. Se definieron las condiciones de operación correspondientes al caso base, incluyendo el material de construcción, el factor de ensuciamiento, las presiones de trabajo y las condiciones de las corrientes de proceso y de servicio.

A partir de esta información, Aspen EDR realizó el dimensionamiento completo del equipo, proporcionando sus características geométricas y operacionales, tales como área de transferencia, dimensiones, coeficientes de transferencia de calor y caídas de presión. En la Figura 32 y Figura 33 se presenta la geometría del intercambiador de refrigeración.

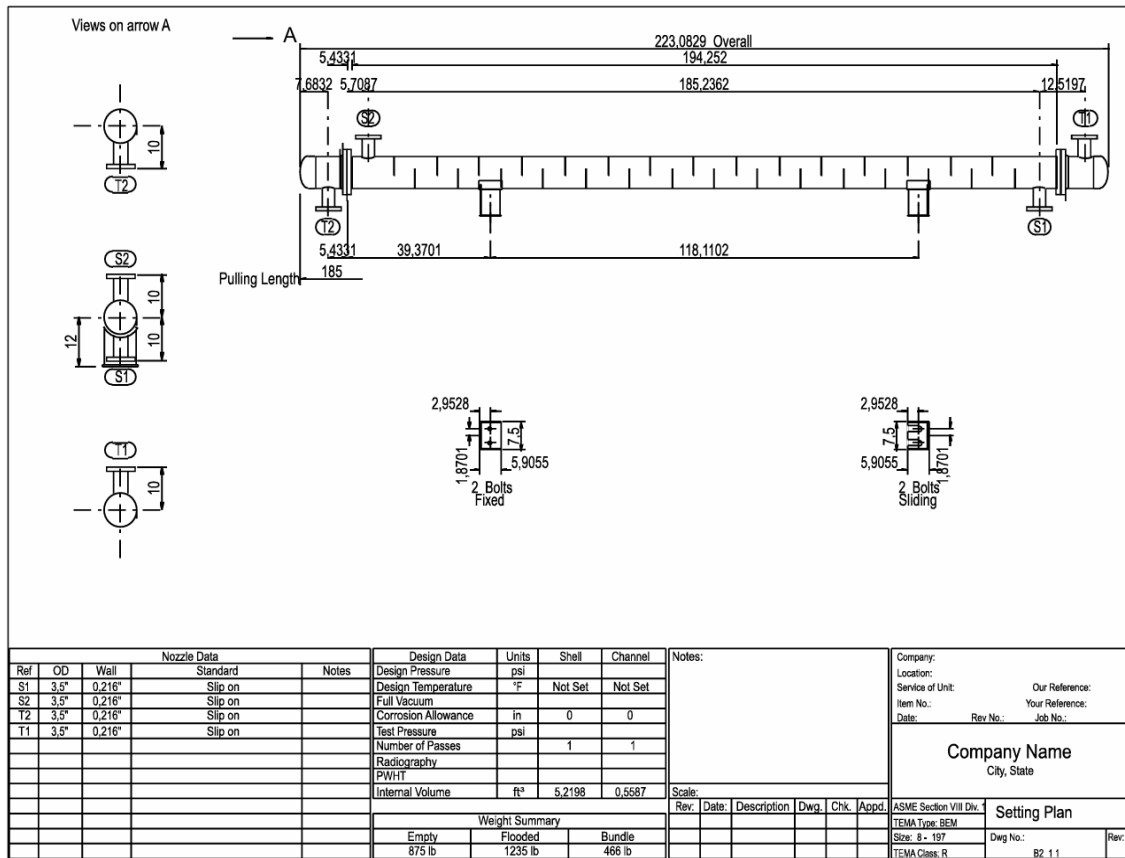


Figura 32. Geometría coraza intercambiador de refrigeración

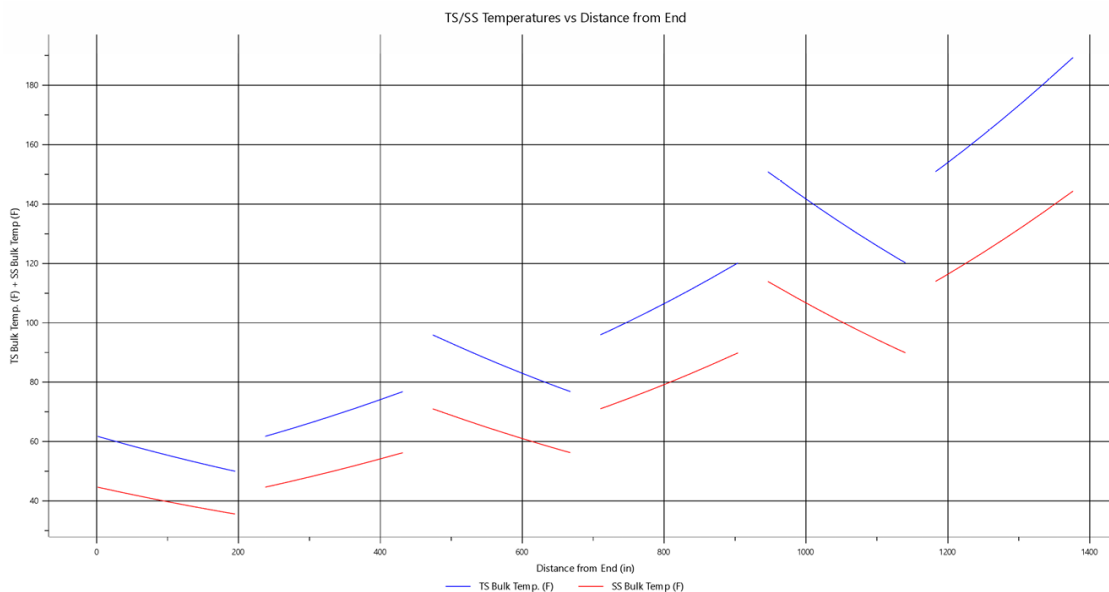


Figura 34. Perfil de temperatura intercambiador de refrigeración

En el anexo se puede encontrar el Datasheet con la información completa de cada intercambiador.

4.7. Calculator y Excel como núcleo de integración

Con el objetivo de automatizar los cálculos de ingeniería de alimentos e incorporar al modelo parámetros de inocuidad, calidad y diseño que no se encuentran disponibles de forma nativa en Aspen Plus, se utilizaron los bloques Calculator. Estos permiten importar variables calculadas por la simulación, procesarlas mediante una rutina interna o una hoja de Microsoft Excel y, cuando corresponde, exportar los resultados nuevamente hacia el flowsheet.

Los bloques Calculator se incorporaron desde la Model Palette de Aspen Plus. Cada uno fue configurado mediante las pestañas Define, Calculate y Sequence. En Define se especificaron las variables importadas desde el proceso y las variables que posteriormente serían exportadas. En Calculate se seleccionó Microsoft Excel como método de cálculo, mientras que en Sequence se estableció el momento de ejecución del bloque dentro de la simulación.

Para el desarrollo del laboratorio virtual se implementaron cuatro bloques principales: uno asociado al tubo de retención, uno para el intercambiador de regeneración, uno para el cooler y un Calculator principal encargado de centralizar las condiciones de entrada, la selección del alimento y la presentación de los resultados globales.

4.7.1. Calculator del tubo de retención

El primer Calculator se implementó para dimensionar el tubo de retención y determinar el tiempo durante el cual el producto permanece a la temperatura del tratamiento. Este bloque es especialmente importante, ya que el largo del tubo no se establece como un valor fijo, sino que se calcula en función de las condiciones de operación y del tratamiento térmico requerido para garantizar la inocuidad del alimento.

A continuación, en la Figura 35 se presenta la pestaña define del calculator del tubo de retención

The screenshot displays the 'Define' tab of a software interface. At the top, there are tabs for 'Define', 'Calculate', 'Sequence', 'Tears', 'Stream Flash', and 'Comments'. Below these, there is a section for 'Active' variables, which includes a list of sampled variables (TEMP, DIAM, DENS, LTUBO, VELO, Q) and a table defining each variable's information flow and definition. Below the table, there are buttons for 'New', 'Delete', 'Copy', 'Paste', 'Move Up', 'Move Down', and 'View Variables'. The 'Edit selected variable' section is active, showing the configuration for the 'TEMP' variable. It includes a 'Category' dropdown (set to 'Streams'), a 'Reference' section with 'Type' (Stream-Var), 'Stream' (3), 'Substream' (MIXED), 'Variable' (TEMP), and 'Units' (C), and an 'Information flow' section with 'Import variable' selected. At the bottom, there are input fields for 'EO input', 'Open variable', and 'Description'.

Variable	Information flow	Definition
TEMP	Import variable	Stream-Var Stream=3 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
DIAM	Import variable	Block-Var Block=RET Variable=IN-DIAM Sentence=PARAM Units=meter
DENS	Import variable	Stream-Var Stream=3 Substream=MIXED Variable=MASS-DENSITY Units=kg/cum
LTUBO	Export variable	Block-Var Block=RET Variable=LENGTH Sentence=PARAM Units=meter
VELO	Import variable	Block-Var Block=RET Variable=PROF-VELOC Sentence=PROFILES ID1=1 Units=m/sec
Q	Import variable	Stream-Var Stream=3 Substream=MIXED Variable=MASS-FLOW Units=kg/sec

Figura 35. definición de variables del Calculator tubo de retención

En la pestaña Define se incorporaron las variables necesarias para realizar los cálculos. Entre ellas se incluyeron la temperatura del producto, el flujo de alimentación, la densidad de la corriente, el diámetro interno del tubo, la velocidad del fluido y la velocidad máxima alcanzada en su interior. Esta última se utilizó para representar la fracción de producto que circula con mayor rapidez y que, por lo tanto, presenta el menor tiempo de residencia dentro del tubo.

También se consideró el largo preliminar del tubo como una variable de referencia. Sin embargo, la longitud obtenida mediante los cálculos se definió como variable de exportación, de manera que el bloque de tubería adopte automáticamente el valor calculado en Excel.

Una vez definidas las variables, en la pestaña Calculate se seleccionó como método de cálculo una hoja de Microsoft Excel. Esta hoja recibe automáticamente los datos provenientes de Aspen Plus y ejecuta los cálculos necesarios para determinar el tiempo de residencia y el largo requerido del tubo. En la Figura 36 se muestra la pestaña donde seleccionar el método.

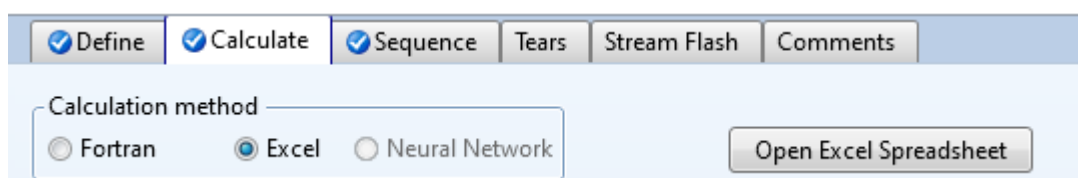


Figura 36. método de cálculo.

El cálculo considera las condiciones hidrodinámicas de la corriente y el tratamiento térmico necesario para cumplir el criterio de inocuidad seleccionado. De esta forma, cuando cambian el flujo de producto, la densidad, el diámetro, la temperatura del UHT o los parámetros microbiológicos del alimento, la longitud requerida se vuelve a calcular.

En esta misma hoja se incorporó el cálculo de la calidad del producto durante su paso por el tubo de retención. Debido a que la degradación de calidad depende tanto de la temperatura como del tiempo de exposición, se realizó una integración numérica a lo largo del tiempo de residencia. Esto permitió obtener la retención del atributo de calidad seleccionado después de la etapa de mantenimiento térmico.

La variable principal exportada desde Excel hacia Aspen Plus corresponde al largo calculado del tubo. Como resultado, la longitud deja de ser un dato ingresado manualmente y pasa a depender directamente de las condiciones de operación y de los parámetros de inocuidad definidos para cada alimento.

En la pestaña Sequence se estableció que este Calculator se ejecute antes del bloque correspondiente al tubo de retención. Esta configuración es necesaria porque Aspen Plus debe

disponer del largo calculado antes de resolver la caída de presión, el volumen interno y las condiciones de salida de la tubería. En la Figura 37 se muestra la pestaña “sequence”.

Calculator block execution sequence

Execute: Before Block type: Unit operation Block name: RET

List variables as import or export

Import variables:

TEMP	DIAM	DENS	VELO	Q
------	------	------	------	---

Export variables:

LTUBO

Figura 37. Secuencia de cálculo tubo de retención.

La incorporación de este Calculator permite que una modificación en el flujo de alimento, en la temperatura UHT o en el microorganismo de referencia produzca automáticamente un nuevo dimensionamiento del tubo. De esta forma, el modelo no queda limitado a una única condición de diseño.

4.7.2. Calculator del intercambiador de regeneración

El segundo Calculator se utilizó para evaluar la contribución del intercambiador de regeneración a la inocuidad y a la pérdida de calidad del producto. En este equipo existen dos corrientes de leche: una corriente fría que ingresa al proceso y es precalentada, y una corriente caliente que sale del tubo de retención y cede energía antes de continuar hacia el cooler.

Debido a que ambas corrientes presentan perfiles de temperatura a lo largo del intercambiador, el efecto térmico no puede representarse utilizando únicamente las temperaturas de entrada y salida. Por esta razón, los cálculos se realizaron considerando la variación de temperatura y el tiempo de permanencia del producto en cada sección del equipo.

En la pestaña Define se incorporaron las variables requeridas para caracterizar ambos lados del intercambiador. Entre ellas se consideraron las temperaturas de entrada y salida, el flujo de producto, la densidad, las dimensiones principales del equipo y las velocidades alcanzadas tanto en los tubos como en la coraza.

También se incorporaron las velocidades máximas correspondientes a cada lado del intercambiador. Estas variables permiten evaluar las partículas que presentan el menor tiempo de residencia y, por consiguiente, la menor exposición al tratamiento térmico dentro del equipo.

A continuación, se muestra en la Figura 38 la pestaña define del calculator de regeneración

The screenshot shows the 'Define' tab of the Aspen Plus calculator interface. At the top, there are tabs for 'Define', 'Calculate', 'Sequence', 'Tears', 'Stream Flash', and 'Comments'. The 'Define' tab is active, indicated by a checkmark. Below the tabs, there is a section for 'Active' variables, which includes a list of sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below).

Variable	Information flow	Definition
VELIN	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=T-INLET-VL Sentence=TUBE-RESULT Units=m/sec
VELOUT	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=T-OUTLET-VL Sentence=TUBE-RESULT Units=m/sec
TIN	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=HOTINT Sentence=STREAM-PROP Units=C
TOUT	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=HOT-TEMP Sentence=STREAM-PROP Units=C
Q	Import variable	Stream-Var Stream=4 Substream=MIXED Variable=MASS-FLOW Units=kg/sec
DENS	Import variable	Stream-Var Stream=4 Substream=MIXED Variable=MASS-DENSITY Units=kg/cum
VSHELL	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=S-WINDOW-VL Sentence=SHELL-RESULT Units=m/sec
TINSHELL	Import variable	Stream-Var Stream=1 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
TOUTSHEL	Import variable	Stream-Var Stream=2 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C

Below the table, there are buttons for 'New', 'Delete', 'Copy', 'Paste', 'Move Up', 'Move Down', and 'View Variables'. Below these buttons is a section for 'Edit selected variable', which is currently set to 'VELIN'. This section includes a 'Variable' dropdown, a 'Category' list (All, Blocks, Streams, Model Utility, Property Parameters, Reactions), a 'Reference' section (Type: Block-Var, Block: REG, Variable: T-INLET-VL, Sentence: TUBE-RESULT, Units: m/sec), and an 'Information flow' section (Import variable, Export variable, Tear variable). At the bottom, there is an 'EO input' section with fields for 'Open variable' and 'Description'.

Figura 38. definición de variables del Calculator regeneración

En la pestaña Calculate se seleccionó nuevamente una hoja de Microsoft Excel. El archivo asociado puede abrirse directamente desde esta sección y recibe los valores actualizados entregados por Aspen Plus.

En Excel se efectuó una integración numérica por segmentos utilizando el perfil térmico del regenerador. Para cada tramo se consideró la temperatura del producto y el tiempo de tránsito

correspondiente. A partir de estos datos se calculó la contribución de la etapa a la letalidad acumulada y a la degradación del parámetro de calidad seleccionado.

Los cálculos se realizaron de manera diferenciada para el lado de los tubos y el lado de la coraza, debido a que las temperaturas, velocidades y tiempos de residencia no son iguales. En la sección fría se evaluó el efecto producido durante el precalentamiento de la alimentación, mientras que en la sección caliente se calculó el efecto correspondiente al enfriamiento inicial del producto tratado.

A diferencia del Calculator del tubo de retención, este bloque no exporta variables operacionales hacia el flowsheet. Su función consiste principalmente en procesar los resultados térmicos e hidrodinámicos del intercambiador y entregar los valores de inocuidad y calidad de cada una de sus secciones.

Por este motivo, no fue necesario establecer una ejecución anterior a un bloque específico. El Calculator se configuró para ejecutarse con la simulación una vez que las variables necesarias hubiesen sido calculadas, asegurando que el análisis se realizara utilizando las condiciones actualizadas del intercambiador.

4.7.3. Calculator del cooler

El tercer Calculator se vinculó al cooler y se utilizó para calcular el efecto térmico que experimenta la leche durante el enfriamiento final. Aunque la temperatura disminuye progresivamente en esta etapa, el producto todavía puede acumular una fracción adicional de letalidad y continuar experimentando degradación de calidad, especialmente durante los primeros tramos del equipo.

En la pestaña Define se incorporaron las variables asociadas a la corriente de leche, entre ellas las temperaturas del perfil térmico, el flujo, la densidad, las dimensiones del intercambiador y la velocidad de circulación del producto.

A continuación se muestra en la Figura 39 la pestaña define del calculator de refrigeración

Define Calculate Sequence Tears Stream Flash Comments

☒ Active

^ Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Information flow	Definition
VIN	Import variable	Block-Var Block=COOLER Variable=T-INLET-VL Sentence=TUBE-RESULT Units=m/sec
VOUT	Import variable	Block-Var Block=COOLER Variable=T-OUTLET-VL Sentence=TUBE-RESULT Units=m/sec
TIN	Import variable	Stream-Var Stream=7 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
TOUT	Import variable	Stream-Var Stream=8 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
*		

New Delete Copy Paste Move Up Move Down View Variables

^ Edit selected variable

Variable: **VOUT**

Category: ☐ All ☒ Blocks ☐ Streams ☐ Model Utility ☐ Property Parameters ☐ Reactions

Reference:

Type: **Block-Var**

Block: **COOLER**

Variable: **T-OUTLET-VL**

Sentence: **TUBE-RESULT**

Units: **m/sec**

Information flow:

☒ Import variable ☐ Export variable ☐ Tear variable

EO input

Open variable:

Description:

Figura 39. definición de variables del Calculator refrigeración.

En este equipo el cálculo se concentró en el lado por el cual circula la leche, ya que el otro lado corresponde únicamente al agua utilizada como servicio de enfriamiento. Por esta razón, la evaluación de inocuidad y calidad se aplicó sobre el recorrido del producto dentro de los tubos del cooler.

La pestaña Calculate se vinculó a una hoja de Excel en la que se realizó nuevamente una integración numérica por segmentos. Para cada tramo se utilizaron la temperatura y el tiempo de permanencia correspondiente, calculando la letalidad acumulada y la retención del atributo de calidad durante el enfriamiento.

Los resultados obtenidos en este Calculator corresponden a la contribución específica del cooler. Aunque su aporte a la letalidad total puede ser bajo en comparación con el UHT y el tubo de retención, su inclusión permite desarrollar un balance completo del historial térmico del producto.

Al igual que en el Calculator del regenerador, los resultados no se utilizaron para modificar directamente variables operacionales del flowsheet. Su finalidad fue calcular y registrar los indicadores de inocuidad y calidad de esta etapa para incorporarlos posteriormente en la interfaz principal.

4.7.4. Calculator principal e interfaz del laboratorio virtual

El cuarto bloque corresponde al Calculator principal de la simulación. Su función es centralizar las variables de entrada del proceso, permitir la selección del alimento que se desea analizar y reunir los resultados obtenidos en los demás bloques Calculator.

Este bloque se vinculó a una hoja de Excel diseñada como interfaz del laboratorio virtual. La interfaz se dividió en dos secciones principales: una destinada a la definición de las condiciones de operación y otra orientada a presentar los resultados de la simulación.

A continuación, en la Figura 40 y Figura 41 se muestra la interfaz de condiciones de operación y de resultados

LECHE VITAMINA B1 COLOR	NECTAR NARANJA COLOR VITAMINA C	CREMA VITAMINA B1 TEXTURA	LECHE CHOCOLATE SALSA TOMATE
--	--	--	--

SABOR

T°C alimentación proceso	5
T°C salida de proceso	10
Flujo Másico kg/h	10000
T°C objetivo UHT °C	145

Fluido a analizar	Leche normal
M.O patron	Clostridium botulinum
F0 (min)	2,54
s	1
parámetro M.O Patrón	
Tref (°C)	121,1
Dref (min)	0,21
z (°C)	10
parámetro de calidad	Color / browning leche
Tref (°C)	130
Dref (min)	0,2
z (°C)	26,7

Figura 40. Interfaz condiciones de operación.

RESULTADOS	
Flujo Másico Proceso kg/h	10143
Presión entrada a Proceso (bar)	5,00
T°C entrada a proceso	5
REG-1	
Presión salida REG 1 (bar)	4,93
T°C Salida REG 1	70
% Calidad salida REG 1	94%
F0 salida REG 1 (min)	0,68
UHT	
T°C Salida UHT	145
Presión salida UHT (bar)	4,929426067
Flujo vapor de servicio kg/h	3000
Presion vapor servicio (bar)	5
T°C vapor de servicio	151,9166068
RETENCÓN	
T°C tubo retención	145
Diametro interno tubo (mm)	108,2
Largo tubo (m)	0,44
Tiempo de residencia tubo (s)	0,62
% Calidad salida tubo	48%
REG-2	
T°C Salida REG 2	87,5
Presión salida REG 2 (bar)	4,72
% Calidad Salida REG 2	99%
F0 Salida REG 2 (min)	1,9E-08
COOLER	
T°C salida COOLER	10
Presión Salida COOLER (bar)	4,67
% Calidad Salida COOLER	99%
F0 Salida COOLER (min)	5,6E-09
PARÁMETROS	
% Calidad Final	45%
F0 total (min)	3,22

Figura 41. Interfaz resultados de la simulación.

4.7.4.1. Definición de la composición del alimento

Una de las funciones principales de la interfaz es permitir la modificación de la composición de la corriente de alimentación. En la implementación desarrollada, la composición no se manipuló como una única variable global, sino mediante el flujo molar individual de cada componente.

Para realizar esta conversión, en la hoja de cálculo se incorporaron la fracción másica de cada componente, su masa molecular y el flujo másico total del alimento. A partir de estos datos,

Excel determina el flujo molar correspondiente a cada especie y lo exporta hacia la corriente de alimentación en Aspen Plus.

De esta manera, cada componente posee una variable de salida independiente. Por ejemplo, para la leche se calculan y exportan los flujos molares de agua, lactosa, potasio, calcio, componentes grasos y del compuesto utilizado para representar la fracción proteica. A continuación en la Figura 42 se muestran los flujos molares exportados a Aspen.

componente	fraccion masica	PM	export aspen
WATER	0,875	18,015	485,7063558
POTAS	0,003	39,1	0,767263427
CALCI	0,003	40,08	0,748502994
M-OLEIC	0,026	282,46	0,920484316
M-N-HEX	0,012	116,16	1,033057851
M-LACTO	0,048	342,3	1,402278703
M-GLUTA	0,033	147,13	2,242914429
N-SUCRO	0	342,3	0
N-GLUCO	0	180,16	0
N-FRUCTO	0	180,16	0
N-A-CITR	0	192,12	0
N-A-ASC	0	176,12	0
MALIC-01	0	134,09	0
SODIU-01	0	58,44	0
TOTAL	1		

Figura 42. Calculo Flujo molar para simulación.

Este procedimiento permite cambiar completamente la composición de la alimentación desde Excel, sin necesidad de modificar individualmente cada componente dentro de Aspen Plus. Al ingresar un nuevo flujo másico total, todos los flujos molares se recalculan manteniendo las fracciones definidas para el alimento seleccionado.

La misma metodología permite utilizar el flowsheet para diferentes productos líquidos. En la interfaz se incorporaron macros asociadas a botones de selección, por ejemplo, Leche, Jugo de naranja, Leche chocolatada y otros productos incluidos en el laboratorio virtual.

Al seleccionar uno de estos botones, la macro carga automáticamente la composición correspondiente, completa las fracciones másicas y calcula los flujos molares que serán exportados hacia Aspen Plus.

Esta automatización evita que el usuario tenga que ingresar manualmente cada fracción o flujo molar cuando desea cambiar el producto. El procedimiento reduce el tiempo requerido para configurar un nuevo caso y disminuye la posibilidad de cometer errores en la composición.

4.7.4.2. Definición de las condiciones de operación

Además de la composición, la interfaz permite establecer las principales condiciones de operación del proceso. Entre las variables exportadas desde Excel se encuentran:

- El flujo másico total del alimento.
- La temperatura de alimentación al proceso.
- La temperatura objetivo a la salida del UHT.
- La temperatura final deseada a la salida del cooler.
- Las condiciones y parámetros asociados al alimento seleccionado.

Estas variables se ingresan directamente en la interfaz y son transferidas al flowsheet cuando se ejecuta la simulación. De esta manera, el usuario puede modificar las condiciones principales sin tener que acceder individualmente a cada corriente o equipo de Aspen Plus.

La temperatura objetivo del UHT constituye una de las variables de mayor importancia, ya que determina la intensidad térmica del proceso. Al modificarla desde la interfaz, el valor se transfiere al modelo y el Design Spec del intercambiador ajusta automáticamente el caudal de vapor requerido.

De forma similar, cuando se modifica la temperatura final del producto, el Design Spec asociado al cooler recalcula el flujo de agua de enfriamiento necesario para alcanzar la nueva condición.

4.7.4.3. Selección del microorganismo y del criterio de inocuidad

La interfaz también incluye los parámetros microbiológicos utilizados en los cálculos de inocuidad. Al seleccionar un alimento, la macro asociada completa automáticamente el nombre del producto, el microorganismo de referencia y los parámetros térmicos necesarios para evaluar el tratamiento.

Por ejemplo, al seleccionar leche, la interfaz identifica el producto como leche y utiliza las esporas de *Clostridium botulinum* como objetivo microbiológico de referencia para el caso base. También actualiza el valor objetivo de letalidad y los parámetros de temperatura de referencia, tiempo de reducción decimal y constante térmica correspondientes.

Cuando se selecciona otro alimento, estos valores cambian de acuerdo con el microorganismo y el criterio térmico definido para ese producto. Los nuevos parámetros son utilizados por las hojas de cálculo del tubo de retención, del regenerador y del cooler.

Esta vinculación permite que todos los Calculator trabajen de forma coordinada. La elección realizada en la interfaz principal determina los datos que serán empleados posteriormente en los cálculos de letalidad de cada etapa y en el dimensionamiento del tubo de retención.

4.7.4.4. Selección del parámetro de calidad

Además del análisis microbiológico, la interfaz permite seleccionar el atributo de calidad que se desea evaluar. Para ello se incorporó una macro que modifica los parámetros cinéticos utilizados en las integraciones numéricas.

En el caso de la leche, por ejemplo, el usuario puede seleccionar la retención de vitamina B1 o el pardeamiento. Al escoger una alternativa, la macro carga automáticamente la temperatura de referencia, el tiempo de reducción decimal y el parámetro de sensibilidad térmica correspondientes al atributo seleccionado.

Estos valores son utilizados por las hojas de cálculo asociadas a las distintas etapas del proceso. De esta manera, una misma simulación térmica puede evaluarse desde diferentes criterios de calidad sin modificar manualmente las fórmulas de cálculo.

La calidad obtenida al final del proceso depende, por lo tanto, tanto del alimento seleccionado como del atributo que se desea estudiar. Si se selecciona vitamina B1, los resultados representan su retención después del tratamiento. Si se selecciona color, los resultados corresponden al comportamiento térmico del indicador asociado al pardeamiento.

4.7.4.5. *Presentación de los resultados*

La segunda sección de la interfaz principal se destinó a mostrar los resultados más relevantes de la simulación. Para ello se importaron variables provenientes de Aspen Plus y se vincularon los resultados generados por las hojas de cálculo de los demás Calculator.

Entre los resultados operacionales considerados se encuentran las temperaturas y presiones de las corrientes en las diferentes etapas, el flujo másico procesado, las caídas de presión, el diámetro y largo del tubo de retención y los flujos de los servicios auxiliares.

También se incorporó el caudal de vapor requerido por el UHT y el flujo de agua utilizado en el cooler. Estos valores son calculados por los Design Specs y permiten relacionar las condiciones de inocuidad y calidad con el consumo energético del proceso.

Los resultados de inocuidad y calidad se obtienen desde las hojas vinculadas al tubo de retención, al regenerador y al cooler. La interfaz muestra el aporte de cada etapa y el valor acumulado al final del proceso.

Para la inocuidad se presentan los valores de letalidad obtenidos en cada sección y el valor final alcanzado por el producto. Para la calidad se muestra la retención calculada en cada etapa y la retención final del atributo seleccionado.

La integración de estos resultados permite analizar simultáneamente tres dimensiones del proceso: el cumplimiento del tratamiento microbiológico, la conservación del atributo de calidad y el consumo de servicios térmicos. Esto facilita la comparación de diferentes temperaturas UHT, caudales, alimentos y condiciones de enfriamiento.

5. CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Condición base de operación

La condición base correspondió al tratamiento UHT indirecto de leche normal mediante el flowsheet desarrollado en Aspen Plus V14. El producto ingresó al sistema a baja temperatura, fue precalentado en el regenerador, calentado hasta la temperatura objetivo en el intercambiador UHT, mantenido a alta temperatura en el tubo de retención y posteriormente enfriado mediante la segunda sección de regeneración y el cooler final.

La Tabla 2 presenta las condiciones de operación para el proceso, el alimento procesado y el parámetro de calidad analizado.

Tabla 2. Condiciones de operación caso base.

Parámetro	Valor
Alimento procesado	Leche normal
Flujo másico especificado	10.000 kg/h
Temperatura de alimentación	5 °C
Presión de alimentación	5 bar
Temperatura objetivo UHT	145 °C
Temperatura final del producto	10 °C
Microorganismo patrón	<i>Clostridium botulinum</i>
F_0 objetivo	2,54 min
Temperatura microbiológica de referencia T_{ref}	121,1 °C
Tiempo de reducción decimal de referencia D_{ref}	0,21 min
Valor z microbiológico	10 °C

Parámetro de calidad	Color/pardeamiento de la leche
Temperatura de referencia de calidad T_{ref}	130 °C
Tiempo de reducción decimal de calidad D_{ref}	0,20 min
Valor z de calidad	26,7 °C

La temperatura UHT seleccionada, correspondiente a 145 °C, se encuentra dentro del intervalo utilizado industrialmente para el procesamiento UHT de productos líquidos de baja acidez. El Codex Alimentarius indica que estos procesos normalmente operan entre 135 y 150 °C, en combinación con tiempos de mantenimiento adecuados para obtener esterilidad comercial (Codex Alimentarius Commission, 1993). De manera similar, el Dairy Processing Handbook señala que la leche suele tratarse entre 135 y 150 °C durante algunos segundos (Tetra Pak, 2025).

El flujo másico calculado por Aspen Plus fue de 10.143 kg/h, mientras que en la interfaz se especificaron 10.000 kg/h. La diferencia correspondió a 143 kg/h, equivalente a un 1,43 %. Esta desviación probablemente se originó durante la transformación de las fracciones másicas y el flujo total en flujos molares individuales para cada componente. También puede relacionarse con el redondeo de las composiciones o con la normalización interna realizada por Aspen Plus. Por lo tanto, antes de realizar nuevos estudios de sensibilidad se debe comprobar que la suma de las fracciones sea exactamente igual a la unidad y que los flujos molares exportados reproduzcan el flujo másico ingresado.

5.2. Resultados térmicos e hidráulicos

La Tabla 3 presenta las temperaturas y presiones obtenidas en las principales etapas del proceso.

Tabla 3. Resultados de Temperatura y Presión.

Etapa	Temperatura de salida (°C)	Presión de salida (bar)	Caída de presión acumulada (bar)
Alimentación	5,0	5,00	0,00
Regeneración de entrada	70,0	4,93	0,07
Intercambiador UHT	145,0	4,929	0,071
Tubo de retención	145,0	—	—
Regeneración de salida	87,5	4,72	0,28
Cooler	10,0	4,67	0,33

El sistema alcanzó correctamente las temperaturas especificadas en cada una de las operaciones principales. La alimentación fue precalentada desde 5 hasta 70 °C en el regenerador, reduciendo la diferencia de temperatura que posteriormente debió cubrir el intercambiador UHT. A continuación, el producto alcanzó 145 °C y mantuvo esta temperatura durante su paso por el tubo de retención.

Después del tratamiento, la leche cedió parte de su energía a la alimentación fría y disminuyó su temperatura desde 145 hasta 87,5 °C. Finalmente, el cooler redujo la temperatura del producto hasta los 10 °C establecidos en la interfaz.

La caída de presión total fue de 0,33 bar, correspondiente a un 6,6 % de la presión inicial. La presión mínima obtenida fue de 4,67 bar a la salida del cooler. En la zona de mayor temperatura, la leche abandonó el UHT a aproximadamente 4,93 bar, por lo que permaneció presurizada durante el tratamiento. En un sistema real, esta condición debe verificarse

considerando la presión absoluta, la presión de vapor del producto y las pérdidas locales que pueden presentarse en placas, válvulas y conexiones.

5.2.1. Servicio de vapor del UHT y agua COOLER

Los resultados del servicio térmico se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados servicios térmico.

Parámetro	Resultado
Temperatura de salida de la leche del UHT	145 °C
Flujo de vapor UHT	3000 kg/h
Carga térmica UHT	903,801 kW
Presión del vapor	5 bar
Temperatura del vapor	151,92 °C
Relación vapor/producto	0,220 kg/kg
Temperatura de entrada del agua al cooler	2 °C
Temperatura de salida del agua del cooler	62 °C
Flujo de agua de enfriamiento	12.200 kg/h
Carga térmica del cooler	851,194 kW
Relación agua/producto	1,20 kg/kg

La temperatura calculada para el vapor fue de 151,92 °C. Este resultado es coherente con vapor próximo a saturación a 5 bar absolutos, ya que en una corriente de vapor saturado la presión y la temperatura se encuentran directamente relacionadas. Además, la transferencia térmica mediante condensación permite utilizar el calor latente del vapor como principal fuente de energía para el calentamiento.

El caudal de vapor correspondió a aproximadamente 0,296 kg de vapor por kilogramo de producto. Sin embargo, el resultado de 3.000 kg/h coincide exactamente con el límite superior establecido en la pestaña **Vary** del Design Spec, cuyo intervalo fue definido entre 2.000 y 3.000 kg/h. Aunque el modelo alcanzó los 145 °C, este resultado indica que la variable manipulada operó en el extremo del intervalo permitido.

Por esta razón, para los análisis de sensibilidad conviene ampliar el límite superior del Design Spec. De lo contrario, un aumento del flujo de leche o de la temperatura objetivo podría impedir la convergencia o mantener artificialmente el vapor en 3.000 kg/h, aun cuando el requerimiento real sea superior.

Para el enfriamiento final se requirió un flujo de agua de 12.200 kg/h, equivalente a aproximadamente 1,20 kg de agua por kilogramo de producto. El agua ingresó al cooler a 2 °C y salió a 62 °C, retirando una carga térmica de 851,194 kW mientras la leche disminuyó su temperatura desde aproximadamente 87 hasta 10 °C. El importante aumento de temperatura del agua muestra que el servicio aprovecha una fracción considerable de su capacidad térmica dentro del equipo.

La carga térmica del cooler correspondió aproximadamente al 94,2 % de la carga del UHT. La similitud entre ambos valores es coherente, debido a que el UHT incorpora energía al producto, mientras que el cooler debe retirar gran parte de la energía remanente después de la recuperación realizada en el regenerador. El caudal de agua también fue ajustado automáticamente mediante un Design Spec, permitiendo mantener la temperatura final de la leche cuando cambian las condiciones de operación.

5.3. Dimensionamiento del tubo de retención

Los resultados del dimensionamiento automático del tubo se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Dimensionamiento tubo de retención.

Parámetro	Resultado
Temperatura del producto	145 °C
Diámetro interno	108,2 mm

Longitud calculada	0,44 m
Tiempo de residencia	0,62 s
F_0 objetivo del tubo	2,54 min
Retención de calidad	48 %

El Calculator determinó una longitud de 0,44 m para un diámetro interno de 108,2 mm. Con esta geometría, el tiempo de residencia de la partícula considerada en el diseño fue de 0,62 s.

Este tiempo es inferior a los “pocos segundos” utilizados habitualmente como referencia para procesos UHT industriales. No obstante, el resultado es consistente con el criterio matemático empleado en el laboratorio virtual. A 145 °C, utilizando una temperatura de referencia de 121,1 °C y un valor z de 10 °C, la velocidad de acumulación de letalidad es aproximadamente 245 veces mayor que a la temperatura de referencia. Por esta razón, una exposición de 0,62 s entrega aproximadamente los 2,54 min de F_0 establecidos como objetivo.

La diferencia respecto de los tiempos industriales no implica necesariamente que el cálculo sea incorrecto. El modelo dimensionó el tubo para cumplir el valor mínimo definido, sin incorporar márgenes adicionales de operación. En una planta real, el tiempo de retención se establece a partir de estudios de validación que consideran las variaciones del flujo, la distribución de tiempos de residencia, la precisión de los instrumentos, los transitorios de operación y las características particulares del producto. El Codex señala expresamente que la validación del flujo de leche y del tiempo de mantenimiento es crítica antes de operar un proceso UHT.

La FDA también indica que el valor de F_0 necesario para controlar las esporas de *Clostridium botulinum* debe definirse para cada producto y acompañarse del método utilizado para calcularlo (U.S. Food and Drug Administration, 1984). En consecuencia, el valor de 2,54 min empleado en esta memoria debe interpretarse como un criterio de diseño seleccionado para el laboratorio virtual y no como un valor universal para todas las formulaciones de leche o todos los sistemas UHT.

El resultado muestra que el largo del tubo es altamente sensible al valor de F_0 adoptado. Si se incorporara un margen de seguridad, un tiempo mínimo industrial o un F_0 superior, la longitud calculada aumentaría proporcionalmente. Esta característica constituye una ventaja del modelo, porque permite evaluar inmediatamente la influencia de cada criterio sobre el diseño físico del tubo.

5.4. Resultados de inocuidad

En la Tabla 6 se presentan los resultados de inocuidad.

Tabla 6. Contribución de cada etapa al F_0 total

Etapas	Intervalo térmico	F_0(min)	Participación en el total
Regeneración de entrada	5–70 °C	$1,9 \times 10^{-8}$	Despreciable
Tubo de retención	145 °C	2,54	78,9 %
Regeneración de salida	145–87,5 °C	0,68	21,1 %
Cooler	87,5–10 °C	$5,6 \times 10^{-9}$	Despreciable
Total	—	3,22	100 %

La interfaz entregó un F_0 total de 3,22 min, obtenido a partir de la suma de las contribuciones térmicas de las distintas etapas del proceso. La regeneración de entrada, donde la leche se precalienta hasta 70 °C, presentó una contribución prácticamente despreciable de $1,9 \times 10^{-8}$ min. En cambio, la regeneración de salida aportó 0,68 min, debido a que el producto ingresa a esta etapa a 145 °C y continúa acumulando letalidad mientras disminuye progresivamente su temperatura. Este resultado confirma que las etapas posteriores al tubo de retención también pueden contribuir al tratamiento térmico total, especialmente cuando el producto permanece durante parte de su recorrido a temperaturas elevadas.

El tubo de retención constituyó la principal etapa de inocuidad, aportando aproximadamente el 78,9 % de la letalidad acumulada. Este resultado es coherente con su función, ya que es la zona diseñada específicamente para mantener el producto a la máxima temperatura del proceso.

La regeneración de salida aportó aproximadamente 0,68 min, equivalentes al 21,1 % del F_0 total. Aunque el producto comienza a enfriarse en esta etapa, todavía permanece durante parte del recorrido a temperaturas elevadas, por lo que continúa acumulando letalidad. Este resultado demuestra la importancia de integrar el perfil térmico completo y no considerar únicamente el tubo de retención.

Las contribuciones de la regeneración de entrada y del cooler fueron prácticamente nulas. En ambas etapas, la mayor parte del recorrido se desarrolla a temperaturas demasiado bajas para producir una contribución relevante al F_0 calculado con una temperatura de referencia de 121,1 °C.

El F_0 total fue un 26,8 % superior al valor objetivo de 2,54 min. Por lo tanto, bajo los supuestos cinéticos utilizados, el proceso cumplió el criterio microbiológico seleccionado. Sin embargo, este exceso no debe interpretarse automáticamente como un sobredimensionamiento inaceptable, ya que parte de la letalidad adicional se acumuló naturalmente durante el enfriamiento regenerativo.

En la interfaz no se reportó de manera independiente la contribución del intercambiador UHT durante el calentamiento desde 70 hasta 145 °C. En consecuencia, el valor de 3,22 min representa la suma de las etapas actualmente integradas en Excel y podría subestimar ligeramente la letalidad térmica total si el perfil de calentamiento del UHT no está incluido en otra hoja.

5.5. Resultados de calidad

El atributo seleccionado para el caso base fue el color o pardeamiento de la leche. Los resultados deben interpretarse exclusivamente como la retención del parámetro cinético escogido y no como una medida de la calidad global del producto. A continuación, en la Tabla 7 se presentan los resultados de retención de calidad.

Tabla 7. Retención de calidad por etapa

Etapas	Retención de calidad	Pérdida en la etapa
Regeneración de entrada	99 %	1 %
Tubo de retención	48 %	52 %
Regeneración de salida	94 %	6 %
Cooler	99 %	1 %
Retención final	45 %	55 % acumulado

El tubo de retención fue la etapa que produjo el mayor deterioro, reduciendo la retención del atributo hasta aproximadamente un 48 %. Este comportamiento se relaciona con la exposición a la temperatura máxima del proceso. Aunque el tiempo calculado fue de solo 0,62 s, los parámetros cinéticos seleccionados para el color muestran una elevada sensibilidad a 145 °C.

La regeneración de salida generó una pérdida adicional aproximada de 6 %. Esta contribución fue menor que la del tubo, pero no resultó despreciable, debido a que la leche ingresó a esta etapa inmediatamente después del tratamiento a alta temperatura.

La regeneración de entrada y el cooler presentaron retenciones cercanas al 99 %, lo que indica que su contribución al deterioro fue baja. En el primer caso, las temperaturas permanecieron entre 5 y 70 °C; en el segundo, el producto se enfrió progresivamente desde 87,5 hasta 10 °C.

La multiplicación de las retenciones mostradas, utilizando los valores redondeados, entrega aproximadamente un 44,2 %, consistente con el 45 % informado en la interfaz. La pequeña diferencia se debe a que Excel realiza el cálculo con valores internos que poseen más cifras decimales que las presentadas en pantalla.

Una retención final de 45 % significa que, de acuerdo con el modelo cinético seleccionado, el proceso provocó una pérdida acumulada cercana al 55 % del indicador asociado

al color. Sin embargo, este resultado no permite concluir por sí solo que la leche obtenida sea inaceptable. La interpretación depende de la relación entre el indicador cinético, el cambio observable en el producto y el límite sensorial o tecnológico considerado aceptable.

El resultado sí evidencia una diferencia importante entre inocuidad y calidad. El proceso alcanzó el F_0 requerido, pero el atributo seleccionado presentó un deterioro considerable. Esta situación demuestra la utilidad del laboratorio virtual para estudiar simultáneamente ambos criterios y evaluar condiciones que reduzcan la carga térmica sin comprometer el objetivo microbiológico.

5.6. Resultados económicos del caso base

La evaluación económica realizada por Aspen Plus entregó los resultados generales presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Resumen económico del caso base

Indicador	Resultado
Costo total de capital	USD 2.091.310
Costo total de operación	USD 958.738/año
Costo anual de utilidades	USD 35.544,4/año
Costo total de equipos	USD 259.300
Costo total instalado	USD 740.400
Tasa de retorno especificada	20 % anual
Costo de materias primas ingresado	USD 0/año
Ventas de producto ingresadas	USD 0/año
Periodo de recuperación calculado	0 años

El costo instalado fue aproximadamente 2,86 veces el costo de adquisición de los equipos. El costo total de capital fue, a su vez, aproximadamente 2,82 veces el costo total instalado. Estos resultados muestran que la inversión estimada incluye costos adicionales a la compra directa de los equipos, aunque el archivo no presenta el detalle de cada factor utilizado.

La distribución de costos por equipo se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Costos de los equipos principales

Equipo	Coto del equipo (USD)	Costo instalado (USD)	Participación en costo de equipos
UHT	90.300	255.200	34,8 %
Regenerador	16.300	118.800	6,3 %
Cooler	152.700	366.400	58,9 %
Splitter	0	0	0 %
Tubo de retención	0	0	0 %
Total	259.300	740.400	100 %

El cooler presentó el mayor costo de adquisición, representando el 58,9 % del costo de los equipos y aproximadamente el 49,5 % del costo instalado. El archivo económico indicó que este equipo fue representado mediante seis carcasas, lo que contribuye a explicar su mayor costo instalado.

El UHT representó el 34,8 % del costo de equipos y el 34,5 % del costo instalado. Sin embargo, la hoja económica lo clasificó dentro de la categoría TEMA HEX, correspondiente a intercambiadores de tubos y coraza, a pesar de que en la simulación térmica fue definido como un intercambiador de placas. Por esta razón, su costo debe considerarse una aproximación preliminar y debería verificarse mediante una categoría de costeo específica para placas o mediante una cotización de proveedor.

El costo del tubo de retención fue informado como cero debido a un error de evaluación en el archivo. El mensaje indicó que debían ingresarse correctamente el flujo o el diámetro de la tubería. En consecuencia, el costo total de equipos y el costo de capital no incluyen este elemento. Aunque su participación probablemente sea menor que la de los intercambiadores, debe incorporarse para completar la estimación.

La hoja de utilidades registró únicamente un consumo eléctrico de 52,32 kW, con un costo de USD 4,0548 por hora. Esto equivale a una tarifa implícita de aproximadamente USD 0,0775/kWh. El costo anual de USD 35.544,4 corresponde a cerca de 8.766 horas de operación, por lo que la estimación supone prácticamente una operación continua durante todo el año.

El costo de utilidades representó solo el 3,7 % del costo total de operación. Además, no se observaron costos individualizados para el vapor ni para el agua de enfriamiento, a pesar de que ambos servicios forman parte fundamental del proceso. Por lo tanto, los USD 35.544,4 anuales deben interpretarse como un costo parcial de utilidades y no como el costo energético completo del tren UHT.

5.7. Discusión integrada

La condición base logró llevar la leche desde 5 hasta 145 °C, mantenerla durante el tiempo calculado y enfriarla posteriormente hasta 10 °C. El proceso alcanzó un F_0 total de 3,22 min, superior al objetivo de 2,54 min, por lo que cumplió el criterio microbiológico seleccionado.

El tiempo de retención de 0,62 s fue inferior al intervalo general de algunos segundos reportado para procesos UHT industriales. Sin embargo, el resultado se explicó por la elevada temperatura utilizada y por el dimensionamiento directo para alcanzar el F_0 objetivo sin incorporar márgenes operacionales. En una aplicación real, el tiempo y el flujo deben validarse considerando la distribución de residencia y la variabilidad del sistema.

Desde el punto de vista de la calidad, la condición fue considerablemente severa para el indicador de color seleccionado. La retención final fue de aproximadamente 45 %, y la principal pérdida ocurrió en el tubo de retención. Por lo tanto, aumentar el tiempo como medida de seguridad acercaría el proceso a las condiciones industriales habituales, pero también podría

incrementar el deterioro. Esta relación representa el principal compromiso que puede estudiarse mediante el laboratorio virtual.

El regenerador mostró un doble efecto. Por una parte, permitió precalentar la alimentación desde 5 hasta 70 °C y reducir el requerimiento térmico del UHT. Por otra, la rama caliente aportó 0,68 min adicionales de F_0 y una pérdida cercana al 6 % del parámetro de calidad. En consecuencia, la recuperación energética no es independiente de la historia térmica del producto.

La simulación también permitió relacionar los resultados térmicos con los costos. Los intercambiadores concentraron la totalidad del costo de equipos calculado, destacando el cooler como el elemento más costoso. No obstante, el análisis económico presentó limitaciones por la ausencia del costo del tubo, la clasificación del UHT como intercambiador TEMA y la falta de costos de vapor y agua.

En términos generales, el modelo cumplió la finalidad del laboratorio virtual, ya que integró en una misma simulación las condiciones de operación, el consumo de servicios, el dimensionamiento del tubo, la inocuidad, la calidad y una estimación económica preliminar. Los resultados demostraron que una condición capaz de satisfacer el criterio microbiológico no necesariamente maximiza la conservación de calidad ni minimiza el costo operacional.

6. CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

6.1. Propósito del análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó para evaluar la respuesta del laboratorio virtual frente a modificaciones en la temperatura objetivo del proceso UHT. Esta variable influye simultáneamente sobre el tiempo necesario para alcanzar la letalidad requerida, el largo del tubo de retención, la conservación del parámetro de calidad y los requerimientos de los servicios de calentamiento y enfriamiento.

Se estudiaron tres temperaturas de salida del UHT: 135, 140 y 145 °C. La condición de 145 °C correspondió al caso base analizado en el capítulo anterior, mientras que las condiciones de 135 y 140 °C permitieron evaluar el efecto de disminuir la intensidad térmica del proceso.

Durante el análisis se mantuvieron constantes la composición de la leche, el flujo másico de alimentación, la temperatura de entrada al proceso, la presión inicial, el diámetro del tubo de retención, la temperatura final del producto y los parámetros cinéticos utilizados para los cálculos de inocuidad y calidad. De esta forma, las diferencias observadas entre los escenarios se relacionan principalmente con la modificación de la temperatura del UHT.

Para cada condición, Aspen Plus y las hojas de cálculo vinculadas recalcularon el tiempo de residencia, el largo del tubo, la letalidad acumulada, la retención de calidad y los requerimientos de vapor y agua de refrigeración. Además, se compararon los costos de capital y de los equipos obtenidos para cada caso.

6.2. Condiciones del análisis

Las condiciones que se mantuvieron constantes durante el análisis de sensibilidad se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Condiciones constantes del análisis de sensibilidad

Parámetro	Valor
Producto procesado	Leche normal
Flujo másico especificado	10.000 kg/h

Flujo másico calculado por Aspen Plus	10.142,84 kg/h
Temperatura de alimentación	5 °C
Presión de alimentación	5 bar
Temperatura final del producto	10 °C
Diámetro interno del tubo de retención	108,204 mm
Microorganismo patrón	<i>Clostridium botulinum</i>
F_0 objetivo del tubo	2,54 min
Temperatura microbiológica de referencia	121,1 °C
Tiempo de reducción decimal de referencia	0,21 min
Valor z microbiológico	10 °C
Parámetro de calidad	Color/pardeamiento de la leche
Temperatura de referencia de calidad	130 °C
Tiempo de reducción decimal de calidad	0,20 min
Valor z de calidad	26,7 °C

La variable modificada directamente fue la temperatura objetivo del UHT. Al cambiar este valor, el Design Spec ajustó el flujo de vapor, mientras que el Calculator del tubo de retención determinó el largo necesario para obtener un F_0 de 2,54 min.

Los principales resultados de las tres simulaciones se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados generales del análisis de sensibilidad

Parámetro	135 °C	140 °C	145 °C

Temperatura de salida de la regeneración caliente	76,25 °C	81,84 °C	87,45 °C
Largo del tubo de retención	4,36 m	1,39 m	0,44 m
Tiempo de residencia	6,21 s	1,96 s	0,62 s
F_0 total	2,607 min	2,754 min	3,220 min
Calidad final retenida	6,98 %	23,62 %	45,00 %
Flujo de vapor	1.920 kg/h	2.060 kg/h	2.236 kg/h
Carga térmica del UHT	775,174 kW	839,112 kW	903,801 kW
Flujo de agua del cooler	12.200 kg/h	12.200 kg/h	12.200 kg/h
Carga térmica del cooler	722,567 kW	786,505 kW	851,194 kW
Temperatura de salida del agua	53,55 °C	57,99 °C	62,44 °C

Los resultados muestran que la temperatura del UHT afecta de manera importante todas las dimensiones analizadas. Al aumentar la temperatura, se redujeron el tiempo de residencia y el largo requerido del tubo, pero aumentaron el consumo de vapor, la carga del UHT y el calor que posteriormente debió retirarse en el cooler.

6.3. Efecto sobre el tubo de retención

La Tabla 12 presenta el efecto de la temperatura sobre el dimensionamiento del tubo de retención.

Tabla 12. Sensibilidad del tubo de retención frente a la temperatura UHT

Temperatura UHT	Tiempo de residencia	Largo del tubo	Reducción del largo respecto de 135 °C
135 °C	6,21 s	4,36 m	—
140 °C	1,96 s	1,39 m	68,1 %
145 °C	0,62 s	0,44 m	89,9 %

El aumento de la temperatura desde 135 hasta 140 °C redujo el tiempo de residencia desde 6,21 hasta 1,96 segundos. Al incrementar nuevamente la temperatura hasta 145 °C, el tiempo disminuyó a 0,62 segundos. La misma tendencia se observó en el largo del tubo, que se redujo desde 4,36 hasta 0,44 m entre los escenarios extremos.

Este comportamiento se debe a que la velocidad de inactivación microbiológica aumenta considerablemente con la temperatura. En consecuencia, para alcanzar el mismo F_0 objetivo se requiere una exposición más corta cuando la leche se encuentra a una temperatura más elevada.

Cada aumento de 5 °C produjo una reducción cercana al 68 % del tiempo y del largo del tubo. Esto resulta coherente con el valor z de 10 °C utilizado para el microorganismo patrón, ya que un incremento de 5 °C aumenta aproximadamente 3,16 veces la velocidad de acumulación de letalidad.

El tiempo de 6,21 segundos obtenido a 135 °C puede considerarse consistente con la descripción general de un tratamiento UHT durante algunos segundos. La condición de 140 °C presentó un tiempo de 1,96 segundos, cercano a referencias que describen tratamientos UHT del orden de dos segundos. Por otra parte, el tiempo de 0,62 segundos obtenido a 145 °C es inferior a los tiempos comúnmente utilizados como referencia industrial. El Codex, sin embargo, no establece una combinación única de temperatura y tiempo, sino que exige utilizar un tiempo de retención apropiado para alcanzar la esterilidad comercial.

La diferencia entre el caso de 145 °C y las referencias industriales no implica que el cálculo desarrollado sea matemáticamente incorrecto. El Calculator determinó el tiempo

mínimo necesario para alcanzar un F_0 de 2,54 min bajo las condiciones ideales del modelo. Una instalación industrial puede emplear tiempos mayores debido a márgenes de seguridad, variaciones del caudal, distribución real de tiempos de residencia, precisión de los instrumentos y criterios microbiológicos específicos del producto.

Por lo tanto, el resultado de 0,62 segundos debe interpretarse como un tiempo teórico obtenido a partir del criterio definido, y no como una recomendación directa para el diseño de una instalación industrial.

6.4. Efecto sobre la inocuidad

El tubo de retención fue dimensionado para entregar un F_0 de 2,54 min en los tres escenarios. Sin embargo, la letalidad total fue superior a este valor debido al aporte producido durante el enfriamiento del producto en la sección caliente del regenerador.

Los resultados de inocuidad se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados de inocuidad para las temperaturas evaluadas

Temperatura UHT	F_0 del tubo	F_0 de la regeneración caliente	F_0 total	Exceso respecto del objetivo
135 °C	2,54 min	0,067 min	2,607 min	2,6 %
140 °C	2,54 min	0,214 min	2,754 min	8,4 %
145 °C	2,54 min	0,680 min	3,220 min	26,8 %

Los tres escenarios cumplieron el criterio microbiológico seleccionado. En la condición de 135 °C, el F_0 total fue de 2,607 min, solo ligeramente superior al valor objetivo. A 140 °C se obtuvo un valor de 2,754 min, mientras que a 145 °C se alcanzaron 3,220 min.

La diferencia entre los escenarios se originó principalmente en la regeneración de salida. La leche ingresó a esta etapa a la temperatura del UHT y continuó acumulando letalidad mientras se enfriaba. Al aumentar la temperatura de tratamiento, también aumentó la

temperatura de salida de la regeneración caliente, desde 76,25 °C en el caso de 135 °C hasta 87,45 °C en el caso de 145 °C.

El aporte de la regeneración caliente pasó de 0,067 a 0,680 min. En el caso base, esta etapa representó aproximadamente un 21 % del F_0 total. Esto demuestra que la evaluación de inocuidad no debe limitarse exclusivamente al tubo de retención, ya que las etapas posteriores pueden aportar una cantidad adicional de letalidad.

Las contribuciones de la regeneración de entrada y del cooler fueron prácticamente despreciables debido a las menores temperaturas alcanzadas. Sin embargo, se mantuvieron dentro del cálculo acumulado para representar de manera completa el historial térmico del producto.

La condición de 145 °C entregó el mayor margen respecto del F_0 objetivo. No obstante, un valor mayor de letalidad no implica necesariamente una condición óptima, debido a que el criterio térmico debe establecerse específicamente para cada producto. La FDA señala que debe definirse el F_0 considerado necesario para destruir las esporas de *Clostridium botulinum* en cada producto y documentarse el método utilizado para calcularlo.

El F_0 total presentado corresponde a las etapas incorporadas en las hojas de cálculo. La contribución del calentamiento dentro del intercambiador UHT no se mostró de manera independiente, por lo que debe considerarse esta limitación al interpretar los valores acumulados.

6.5. Efecto sobre la calidad

La calidad se evaluó utilizando como indicador el color o pardeamiento de la leche. Los valores representan la fracción del atributo retenida después de cada etapa y no deben interpretarse como una medida de la calidad global del producto.

Los resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Retención del parámetro de calidad por etapa

Etapa	135 °C	140 °C	145 °C

Regeneración de entrada	99,23 %	99,23 %	99,00 %
Tubo de retención	7,33 %	25,17 %	48,00 %
Regeneración de salida	96,73 %	95,46 %	94,00 %
Cooler	99,14 %	99,09 %	99,00 %
Calidad final	6,98 %	23,62 %	45,00 %

La calidad final aumentó al incrementar la temperatura del UHT. A 135 °C se obtuvo una retención de solo 6,98 %, mientras que a 140 y 145 °C se alcanzaron retenciones de 23,62 y 45 %, respectivamente.

A primera vista, esta tendencia puede parecer contraria a lo esperado, debido a que una temperatura mayor acelera la degradación térmica. Sin embargo, en este análisis el tiempo de residencia no se mantuvo constante. Al aumentar la temperatura se redujo considerablemente el tiempo necesario para alcanzar el F_0 objetivo, disminuyendo la exposición total del producto.

La principal diferencia se produjo en el tubo de retención. A 135 °C, la leche permaneció 6,21 segundos y conservó solo el 7,33 % del indicador de calidad. A 140 °C, el tiempo disminuyó a 1,96 segundos y la retención aumentó a 25,17 %. Finalmente, a 145 °C y 0,62 segundos se obtuvo una retención de 48 %.

Por lo tanto, en el intervalo estudiado, la reducción del tiempo de residencia tuvo un efecto más importante que el incremento de temperatura sobre el deterioro acumulado. Este resultado representa el principio de tratamiento a alta temperatura durante un tiempo corto, característico del procesamiento UHT.

La regeneración de salida presentó la tendencia contraria. La retención disminuyó desde 96,73 hasta 94 % al aumentar la temperatura, debido a que el producto ingresó a esta etapa con una mayor carga térmica. Sin embargo, esta pérdida adicional fue menor que la mejora obtenida por la reducción del tiempo en el tubo.

La regeneración de entrada y el cooler presentaron retenciones cercanas al 99 % en los tres escenarios, por lo que su contribución al deterioro fue reducida.

La retención final de 45 % obtenida a 145 °C no significa que la leche conserve únicamente el 45 % de su calidad total. El valor corresponde exclusivamente al parámetro cinético seleccionado para representar color o pardeamiento. Otros atributos, como vitaminas, sabor, proteínas o textura, pueden presentar una respuesta térmica diferente.

6.6. Efecto sobre los servicios térmicos

Los resultados asociados al vapor utilizado en el UHT y al agua de refrigeración del cooler se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Requerimientos térmicos del UHT y del cooler

Parámetro	135 °C	140 °C	145 °C
Flujo de vapor del UHT	1.920 kg/h	2.060 kg/h	2.236 kg/h
Relación vapor/producto	0,189 kg/kg	0,203 kg/kg	0,220 kg/kg
Carga térmica del UHT	775,174 kW	839,112 kW	903,801 kW
Flujo de agua del cooler	12.200 kg/h	12.200 kg/h	12.200 kg/h
Relación agua/producto	1,20 kg/kg	1,20 kg/kg	1,20 kg/kg
Temperatura de salida del agua	53,55 °C	57,99 °C	62,44 °C
Carga térmica del cooler	722,567 kW	786,505 kW	851,194 kW

El flujo de vapor aumentó progresivamente con la temperatura objetivo. Para calentar la leche hasta 135 °C se requirieron 1.920 kg/h de vapor, mientras que para alcanzar 140 y 145 °C fueron necesarios 2.060 y 2.236 kg/h, respectivamente.

Entre los escenarios extremos, el flujo de vapor aumentó aproximadamente un 16,5 %. La relación vapor/producto pasó de 0,189 kg/kg a 135 °C a 0,220 kg/kg a 145 °C.

La carga térmica del UHT presentó una tendencia similar. Esta aumentó desde 775,174 hasta 903,801 kW, equivalente a un incremento de aproximadamente 16,6 %. El

comportamiento es coherente con el mayor salto térmico que debe experimentar la leche cuando se establece una temperatura de salida más elevada.

Los resultados demuestran que el Design Spec respondió correctamente frente al cambio de la temperatura objetivo, modificando el flujo de vapor de acuerdo con el requerimiento energético de cada escenario.

En el cooler, el flujo de agua de refrigeración se mantuvo constante en 12.200 kg/h para las tres condiciones. No obstante, la carga térmica aumentó desde 722,567 hasta 851,194 kW, debido a que la leche ingresó al cooler a temperaturas progresivamente mayores.

Al mantenerse constante el flujo de agua, el aumento de la energía retirada se manifestó como un incremento en la temperatura de salida del servicio. El agua salió a 53,55 °C para el caso de 135 °C, a 57,99 °C para 140 °C y a 62,44 °C para 145 °C.

Por lo tanto, el mayor requerimiento de enfriamiento no se cubrió aumentando la cantidad de agua, sino permitiendo que el mismo caudal experimentara un aumento de temperatura superior. Este resultado también indica que la temperatura de salida del agua constituye una variable importante para evaluar la factibilidad del cooler y las posibilidades de recuperación o reutilización de este servicio.

La carga térmica del cooler correspondió aproximadamente al 93–94 % de la carga del UHT en los tres casos. La diferencia entre ambas cargas se relaciona principalmente con la energía recuperada en el regenerador antes de que el producto ingrese al cooler.

El incremento de la temperatura UHT, por lo tanto, presenta un costo energético doble: aumenta el flujo de vapor necesario para el calentamiento y eleva la cantidad de calor que debe retirarse posteriormente durante el enfriamiento.

6.7. Análisis económico de los escenarios

Los costos obtenidos para las tres condiciones se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Comparación económica de los escenarios analizados

Indicador	135 °C	140 °C	145 °C

Costo total de capital	USD 2.216.500	USD 2.211.840	USD 2.091.310
Costo total de operación	USD 961.951/año	USD 961.755/año	USD 958.738/año
Costo total de equipos	USD 352.400	USD 346.900	USD 259.300
Costo total instalado	USD 868.300	USD 862.600	USD 740.400
Costo del UHT	USD 183.400	USD 177.900	USD 90.300
Costo instalado del UHT	USD 383.100	USD 377.400	USD 255.200
Área de transferencia reportada para el UHT	731,85 m ²	702,05 m ²	284,21 m ²

El costo total de capital disminuyó desde USD 2.216.500 para el caso de 135 °C hasta USD 2.091.310 para el caso de 145 °C. Esta diferencia representa una reducción aproximada de 5,6 %.

La mayor variación se observó en el costo del UHT. El costo calculado para este equipo fue de USD 183.400 a 135 °C, USD 177.900 a 140 °C y USD 90.300 a 145 °C. La disminución se relacionó con el área de transferencia reportada por la evaluación económica.

Sin embargo, esta tendencia debe interpretarse con precaución. Desde el punto de vista energético, la carga térmica aumentó con la temperatura, por lo que la reducción del área no puede atribuirse únicamente a una menor demanda de transferencia. El resultado puede estar relacionado con modificaciones en la geometría seleccionada, diferencias en la fuerza impulsora térmica o con el método utilizado por Aspen para evaluar el equipo.

Además, en la hoja económica el UHT fue clasificado mediante una correlación para intercambiadores TEMA, a pesar de que en el flowsheet se configuró como un intercambiador de placas. Por esta razón, los valores obtenidos deben considerarse una estimación comparativa preliminar y no una cotización definitiva del equipo.

Los costos del regenerador y del cooler permanecieron constantes en los tres escenarios. Esto indica que sus configuraciones no fueron redimensionadas económicamente durante el análisis de sensibilidad, aun cuando cambiaron sus temperaturas y cargas térmicas.

El tubo de retención presentó costo cero en los archivos debido a un error de evaluación asociado a la falta de reconocimiento del flujo o del diámetro de la tubería. Esta omisión afecta especialmente al escenario de 135 °C, ya que su tubo posee una longitud casi diez veces superior a la del caso de 145 °C.

El costo total de operación presentó una variación inferior al 0,4 %. Este resultado no refleja completamente la sensibilidad energética observada, ya que la hoja de costos mantuvo constante el costo anual de utilidades y no incorporó de manera diferenciada el consumo de vapor y el uso de agua de refrigeración.

En consecuencia, los costos de capital permiten realizar una comparación preliminar entre las configuraciones, pero los costos operacionales deberán actualizarse utilizando los consumos reales de vapor y las condiciones del agua obtenidas para cada escenario.

6.8. Discusión integrada

La comparación de los tres escenarios muestra que disminuir la temperatura no necesariamente mejora la conservación de calidad. Cuando el F_0 del tubo se mantiene constante, una menor temperatura requiere un mayor tiempo de residencia, lo que puede aumentar significativamente el deterioro acumulado.

La condición de 135 °C presentó el menor requerimiento de vapor y las menores cargas térmicas del UHT y del cooler. Sin embargo, necesitó un tubo de 4,36 m y un tiempo de residencia de 6,21 segundos. Como consecuencia de esta exposición prolongada, la calidad final disminuyó hasta 6,98 %. El F_0 total fue de 2,607 min, por lo que el proceso cumplió el criterio con un margen reducido.

La condición de 140 °C presentó resultados intermedios. El tubo disminuyó a 1,39 m y el tiempo de residencia a 1,96 segundos. La calidad final aumentó a 23,62 % y el F_0 total alcanzó 2,754 min. El flujo de vapor fue de 2.060 kg/h, inferior al requerido para el caso base.

El caso de 145 °C presentó el tubo más corto, el menor tiempo de residencia y la mayor retención del parámetro de calidad. También alcanzó el mayor F_0 total. Sin embargo, fue la condición de mayor consumo de vapor y mayor carga de enfriamiento. Además, el tiempo de 0,62 segundos es inferior a los tiempos utilizados como referencia en numerosos procesos industriales, por lo que requeriría una validación más rigurosa antes de ser considerado como condición de diseño.

La comparación demuestra que la temperatura óptima depende del criterio priorizado. Si se busca minimizar el consumo de vapor, el escenario de 135 °C resulta más favorable, pero presenta el mayor deterioro y el tubo de mayor longitud. Si se busca reducir el tamaño del tubo y conservar mejor el indicador de calidad, el escenario de 145 °C presenta mejores resultados, aunque requiere mayor energía y posee el tiempo teórico más corto.

La condición de 140 °C representa un escenario intermedio, con un tiempo de residencia cercano a dos segundos, menor consumo energético que el caso base y una retención de calidad superior a la obtenida a 135 °C. Por esta razón, puede considerarse una condición de compromiso entre factibilidad operativa, consumo energético, inocuidad y calidad.

No obstante, no es posible establecer una condición óptima definitiva sin definir previamente un límite aceptable para la retención del atributo de calidad, incorporar un margen industrial de seguridad microbiológica y calcular correctamente los costos variables del vapor y del agua.

6.9. Principales resultados del análisis

Los principales efectos identificados fueron los siguientes:

- El aumento de 135 a 145 °C redujo aproximadamente un 90 % el tiempo de residencia y el largo del tubo.
- El F_0 total aumentó desde 2,607 hasta 3,220 min.
- La calidad final aumentó desde 6,98% hasta 45 %, debido principalmente a la reducción del tiempo de exposición.
- El flujo de vapor aumentó un 16,5 %.

- La carga térmica del UHT aumentó un 16,6 %.
- La carga térmica del cooler aumentó un 17,8 %.
- El flujo de agua se mantuvo constante, pero su temperatura de salida aumentó desde 53,55 hasta 62,44 °C.
- Los costos de capital disminuyeron en la evaluación de Aspen; sin embargo, esta tendencia se encuentra condicionada por el método de costeo y por la clasificación del UHT como intercambiador TEMA.

En términos generales, el análisis confirmó que el laboratorio virtual responde de manera fenomenológicamente coherente frente a la modificación de la temperatura. Al aumentar la temperatura, disminuyeron el tiempo y el largo del tubo, aumentó la letalidad adicional del proceso y se incrementaron los requerimientos de calentamiento y enfriamiento.

El resultado más relevante fue que el escenario de mayor temperatura conservó mejor el parámetro de calidad analizado. Esto demuestra que, cuando la inocuidad se mantiene constante, la relación entre temperatura y tiempo debe analizarse de forma conjunta, ya que una temperatura menor acompañada de una exposición prolongada puede provocar un deterioro mayor que un tratamiento más intenso y breve.

7. CAPÍTULO VII. MANUAL DE OPERACIÓN

7.1. Objetivo del manual de operación

El presente manual tiene como objetivo establecer el procedimiento necesario para operar correctamente el laboratorio virtual desarrollado en Aspen Plus V14. Su incorporación permite trasladar el modelo desde una aplicación exclusivamente técnica hacia una herramienta metodológica y pedagógica, mediante la cual el usuario puede modificar las condiciones de operación, ejecutar la simulación y analizar el comportamiento del proceso de esterilización continua de alimentos líquidos.

El laboratorio virtual integra Aspen Plus, Aspen Exchanger Design and Rating (EDR), Microsoft Excel y Aspen Process Economic Analyzer. Cada una de estas herramientas cumple una función específica dentro del modelo. Aspen Plus resuelve los balances de masa y energía, EDR permite consultar el diseño de los intercambiadores, Excel desarrolla los cálculos de inocuidad, calidad y dimensionamiento, mientras que Aspen Process Economic Analyzer entrega una estimación preliminar de los costos asociados al proceso.

La finalidad pedagógica del laboratorio virtual no consiste únicamente en obtener resultados finales. El modelo permite observar cómo una modificación en la temperatura, el flujo de alimentación o el alimento procesado afecta las distintas etapas del sistema. De esta forma, el usuario puede relacionar las variables operacionales con el consumo de servicios, el tiempo de residencia, el largo del tubo, la letalidad microbiológica y la conservación de calidad.

Además, las hojas de cálculo asociadas al tubo de retención, al regenerador y al cooler permiten revisar directamente los cálculos realizados para obtener los resultados mostrados en la interfaz principal. Esto facilita la comprensión de las integraciones numéricas, los perfiles térmicos y las ecuaciones utilizadas, aportando trazabilidad al modelo y permitiendo que el usuario no se limite a observar únicamente los valores finales.

Para operar correctamente el laboratorio virtual se debe seguir una secuencia específica. En particular, las hojas de cálculo asociadas a los bloques Calculator deben abrirse en un orden obligatorio antes de ejecutar la simulación.

7.2. Apertura de la simulación

El procedimiento comienza abriendo el archivo de simulación en Aspen Plus V14. Una vez cargado el modelo, se debe ingresar a la pestaña Simulation, donde se encuentra el flowsheet completo del proceso.

En esta sección se pueden observar las corrientes de alimentación y servicio, el regenerador, el intercambiador UHT, el tubo de retención, el divisor de flujo, el cooler y los bloques Calculator vinculados a las hojas de Microsoft Excel.

Antes de ejecutar la simulación se debe verificar que los equipos, corrientes, Design Specs y bloques Calculator se encuentren activos. La simulación no debe iniciarse hasta abrir las cuatro hojas de cálculo en el orden establecido en la sección siguiente.

7.3. Apertura de los bloques Calculator y sus hojas de cálculo

Antes de ejecutar el modelo se deben abrir los cuatro bloques Calculator y sus correspondientes hojas de Microsoft Excel. Este procedimiento debe realizarse obligatoriamente en el orden indicado, ya que cada libro cumple una función determinada dentro del intercambio de información entre Excel y Aspen Plus. En la Figura 43 se indican los Calculator en el Flowsheet.

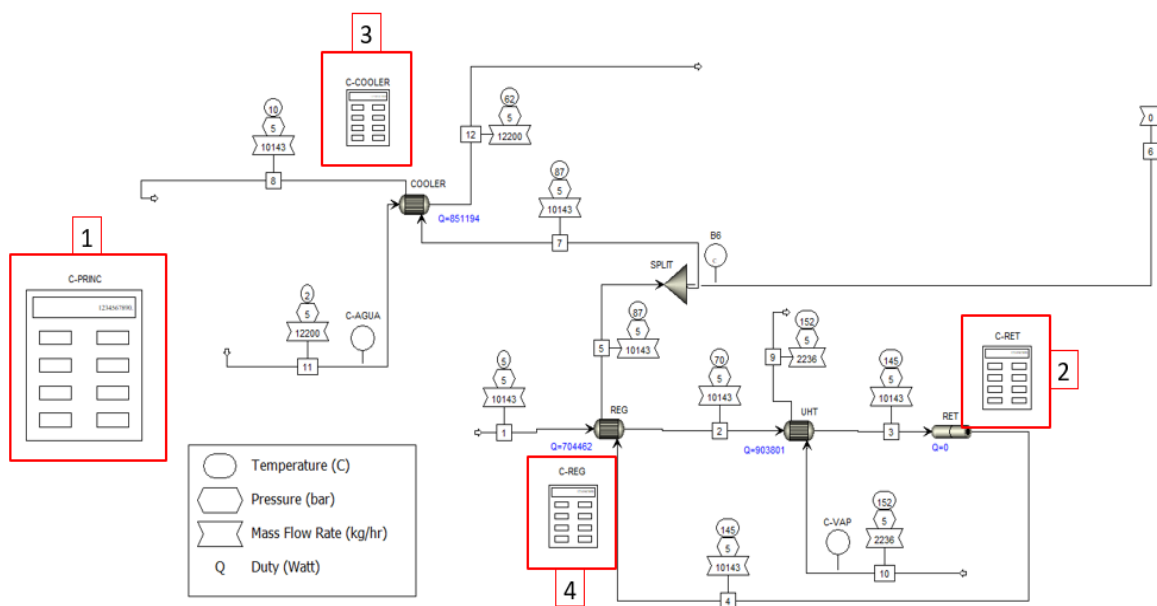


Figura 43. Secuencia de Calculator en Flowsheet.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el orden de apertura es el siguiente:

Tabla 17. Orden obligatorio de apertura de los bloques Calculator

Orden	Bloque Calculator	Función principal
1	C-PRINCE	Definición del alimento, condiciones de operación y presentación de resultados
2	C-RET	Dimensionamiento del tubo de retención y cálculo de inocuidad y calidad
3	C-COOLER	Cálculo de inocuidad y calidad durante el enfriamiento
4	C-REG	Cálculo de inocuidad y calidad en las dos secciones del regenerador

Este orden debe respetarse en todas las ejecuciones. Por lo tanto, el primer libro que debe abrirse siempre es el asociado a C-PRINCE, seguido por C-RET, C-COOLER y finalmente C-REG.

No se debe ejecutar la simulación si alguno de los libros se encuentra cerrado o si se ha modificado el orden de apertura. Una secuencia incorrecta puede impedir la actualización de las variables, generar errores de conexión con Excel o producir resultados asociados a una ejecución anterior. Las cuatro hojas deben permanecer abiertas durante toda la simulación.

7.3.1. Apertura del Calculator principal

El primer bloque que debe abrirse es C-PRINCE, correspondiente al Calculator principal del laboratorio virtual. Para ello, se debe hacer doble clic sobre el bloque dentro del flowsheet e ingresar a la pestaña Calculate. Desde esta pestaña se abre el archivo de Excel asociado. Este libro contiene la interfaz principal desde la cual se definen las condiciones de operación, se selecciona el alimento, se escoge el parámetro de calidad y se visualizan los resultados globales.

Este archivo debe ser siempre el primer libro abierto, ya que contiene las variables principales que posteriormente serán utilizadas por los demás Calculator.

7.3.2. Apertura del Calculator del tubo de retención

El segundo bloque que debe abrirse es C-RET, asociado al tubo de retención. Se debe hacer doble clic sobre el bloque, ingresar a la pestaña Calculate y abrir la hoja de cálculo correspondiente.

Este libro recibe desde Aspen Plus las temperaturas, el flujo, la densidad, el diámetro del tubo, la velocidad máxima y las demás variables necesarias para calcular el tiempo de residencia y el largo requerido.

La longitud calculada es exportada nuevamente hacia Aspen Plus, por lo que la hoja debe encontrarse abierta antes de resolver el bloque correspondiente al tubo.

Además de entregar el resultado final, la hoja permite visualizar todos los cálculos desarrollados para determinar el largo, el tiempo de residencia, la letalidad acumulada y la calidad retenida. Esto permite revisar cada una de las operaciones realizadas y comprender cómo las condiciones de proceso se relacionan con el diseño del tubo.

7.3.3. Apertura del Calculator del cooler

El tercer bloque que debe abrirse es C-COOLER. Se debe ingresar al bloque, abrir la pestaña Calculate y cargar el tercer libro de Excel.

Esta hoja recibe el perfil de temperatura del producto, las velocidades, las dimensiones y las condiciones de operación del cooler. Con esta información se realiza la integración numérica necesaria para determinar la contribución de esta etapa a la letalidad y a la degradación del parámetro de calidad.

El usuario puede revisar dentro de la hoja todos los segmentos utilizados, las temperaturas asociadas, los tiempos de residencia parciales y los cálculos que conducen al F_0 y a la retención de calidad reportados finalmente en la interfaz principal.

7.3.4. Apertura del Calculator de regeneración

El cuarto y último bloque que debe abrirse es C-REG, correspondiente al intercambiador de regeneración. Desde su pestaña Calculate se abre el cuarto libro de Excel.

En esta hoja se procesan por separado las condiciones de la corriente fría y de la corriente caliente del regenerador. Se utilizan las temperaturas, velocidades y tiempos de permanencia para calcular la letalidad y la pérdida de calidad en ambas secciones.

Al igual que en los libros anteriores, la hoja permite observar todos los cálculos intermedios realizados. El usuario puede revisar la discretización del perfil térmico, los tiempos calculados para cada segmento y la forma en que las contribuciones parciales se combinan para obtener los resultados de regeneración presentados en la interfaz principal.

7.4. Configuración de las condiciones de operación

Después de abrir los cuatro libros se debe regresar a la hoja de cálculo asociada al bloque C-PRINCE. Esta interfaz contiene las principales variables que el usuario debe especificar antes de ejecutar el modelo.

Las condiciones de operación que deben definirse son:

- Temperatura de alimentación del proceso.
- Temperatura final deseada del producto.
- Flujo másico de alimentación.
- Temperatura objetivo del UHT.

La temperatura de alimentación corresponde a la condición en la que el alimento ingresa al regenerador. La temperatura de salida representa el valor que se desea alcanzar después del cooler. El flujo másico define la capacidad de procesamiento, mientras que la temperatura objetivo del UHT corresponde a la máxima temperatura alcanzada por el producto.

Estas variables deben ingresarse directamente en las celdas habilitadas de la interfaz. No es necesario modificar manualmente las corrientes o los equipos dentro de Aspen Plus, ya que el Calculator principal exporta los valores al flowsheet durante la ejecución.

La modificación de estas condiciones produce cambios en diferentes partes del proceso. Por ejemplo, un aumento del flujo de alimentación puede incrementar el consumo de vapor y el largo requerido del tubo. De la misma manera, un aumento de la temperatura del UHT reduce el tiempo necesario para alcanzar la letalidad objetivo, pero eleva las cargas térmicas de calentamiento y enfriamiento.

7.5. Selección del alimento

Una vez establecidas las condiciones de operación, se debe seleccionar el alimento que será procesado. La interfaz incluye botones asociados a los productos incorporados al laboratorio virtual, entre ellos:

- Leche.
- Néctar de naranja.
- Crema.
- Leche chocolatada.
- Salsa de tomate.

Al presionar uno de los botones, una macro carga automáticamente la composición correspondiente al producto. A partir de las fracciones másicas, el flujo total y las masas moleculares, la hoja calcula los flujos molares de cada componente y los exporta hacia Aspen Plus.

De esta forma, el usuario no necesita modificar manualmente la composición dentro de la corriente de alimentación. La selección del producto actualiza simultáneamente todos los componentes necesarios.

La macro también modifica los parámetros microbiológicos asociados al alimento, entre ellos:

- Nombre del alimento.
- Microorganismo patrón.

- F_0 objetivo.
- Temperatura de referencia.
- Tiempo de reducción decimal de referencia.
- Valor z.

Por ejemplo, al seleccionar leche, la interfaz carga la composición definida para la leche normal y utiliza las esporas de *Clostridium botulinum* como objetivo microbiológico de referencia para el caso base.

7.6. Selección del parámetro de calidad

Después de seleccionar el producto, se debe escoger el atributo de calidad que se desea analizar. Las alternativas disponibles dependen del alimento seleccionado.

En el caso de la leche, por ejemplo, la interfaz permite evaluar:

- Vitamina B1.
- Color o pardeamiento.

Para otros alimentos pueden seleccionarse parámetros como vitamina C, textura u otros atributos incorporados previamente.

Al presionar el botón correspondiente, la macro actualiza automáticamente:

- El nombre del atributo de calidad.
- La temperatura de referencia.
- El tiempo de reducción decimal de referencia.
- El valor z asociado al deterioro.

Los parámetros cargados son utilizados por las hojas de retención, regeneración y cooler para realizar los cálculos de calidad. Por lo tanto, una misma simulación térmica puede evaluarse utilizando distintos indicadores sin modificar manualmente las ecuaciones.

Antes de ejecutar el modelo se debe comprobar que la interfaz muestre correctamente:

- El alimento seleccionado.
- El microorganismo patrón.
- El criterio de inocuidad.
- Los parámetros microbiológicos.
- El parámetro de calidad.
- Los parámetros cinéticos de calidad.

7.7. Activación de la secuencia del Calculator principal

Después de definir el alimento, el parámetro de calidad y las condiciones de operación, se debe regresar a Aspen Plus y abrir nuevamente el bloque C-PRINCE.

Dentro del Calculator se debe ingresar a la pestaña Sequence y seleccionar la opción “Based on order in sequence” como se observa en la Figura 44.

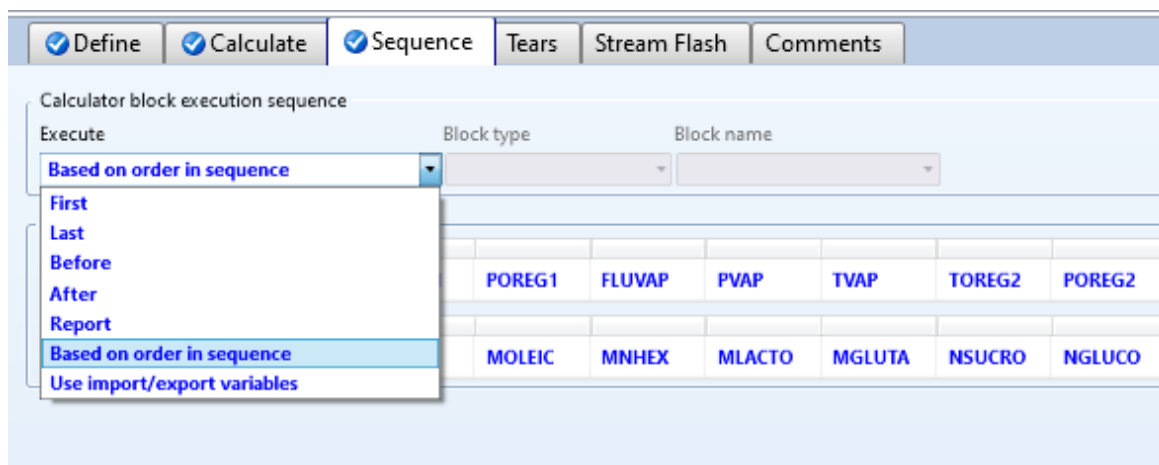


Figura 44. Pestaña Sequence para correr la simulación.

Esta opción permite que Aspen Plus ejecute el Calculator siguiendo el orden establecido dentro de la secuencia del modelo.

Cuando Based on order in sequence ya se encuentra seleccionado desde una ejecución anterior, puede ser necesario forzar la actualización del bloque. Para ello, se debe seleccionar

temporalmente otra opción, por ejemplo, Before, y posteriormente volver a elegir Based on order in sequence.

Este procedimiento reactiva la ejecución del Calculator y permite que los nuevos valores ingresados en Excel sean transferidos al flowsheet. Debe realizarse cada vez que se modifique el alimento, la composición, el flujo, la temperatura objetivo o cualquier otra condición de operación.

7.8. Ejecución de la simulación

Después de abrir los cuatro libros, configurar las condiciones y reactivar la secuencia del Calculator principal, se puede ejecutar la simulación mediante el comando **Run**.

Durante la ejecución se realiza el siguiente procedimiento:

- I. El Calculator principal exporta la composición y las condiciones de operación hacia el flowsheet.
- II. El Calculator del tubo calcula el largo requerido antes de resolver la etapa de retención.
- III. El Design Spec del UHT ajusta el flujo de vapor para alcanzar la temperatura objetivo.
- IV. Aspen Plus resuelve los balances de masa y energía del proceso.
- V. El Design Spec del cooler determina el servicio necesario para alcanzar la temperatura final.
- VI. Las hojas de retención, regeneración y cooler ejecutan sus cálculos de inocuidad y calidad.
- VII. Los resultados obtenidos se reúnen en la interfaz principal.

Durante la simulación, los libros de Excel pueden actualizarse varias veces. Se debe esperar hasta que Aspen Plus indique que la ejecución ha finalizado y que el flowsheet ha convergido.

Si la simulación presenta errores, se deben revisar principalmente:

- El orden de apertura de los libros.

- Que las cuatro hojas permanezcan abiertas.
- La selección de Based on order in sequence.
- Los límites de los Design Specs.
- Los valores ingresados en la interfaz.
- La conexión entre las variables importadas y exportadas.

7.9. Revisión de los cálculos en las hojas de Excel

Una de las principales ventajas pedagógicas del laboratorio virtual es que los resultados no se presentan como valores obtenidos mediante una operación interna desconocida para el usuario. Las hojas asociadas a C-RET, C-COOLER y C-REG permiten observar directamente los procedimientos empleados.

En la hoja del tubo de retención se pueden revisar:

- La conversión del flujo másico a caudal volumétrico.
- Las velocidades utilizadas.
- El cálculo del tiempo de residencia.
- La determinación del largo del tubo.
- La integración de letalidad.
- El cálculo de la retención de calidad.

En la hoja del cooler se pueden consultar:

- Los puntos del perfil térmico.
- Los tiempos parciales de tránsito.
- La letalidad calculada en cada segmento.
- La calidad retenida en cada tramo.
- Los resultados acumulados de la etapa.

En la hoja del regenerador se pueden observar:

- Los perfiles de temperatura de ambas corrientes.
- Los cálculos realizados para tubos y coraza.
- Los tiempos de residencia asociados a cada lado.
- Las contribuciones parciales de letalidad.
- La pérdida de calidad en la regeneración fría y caliente.

La posibilidad de revisar estos cálculos permite relacionar los resultados finales con las ecuaciones presentadas en la metodología. También facilita la detección de errores en referencias de celdas, unidades, perfiles de temperatura o datos importados desde Aspen Plus.

7.10. Revisión de resultados en la interfaz principal

Una vez finalizada la simulación, se debe regresar al libro asociado a C-PRINCE. En su sección de resultados se presentan los valores más importantes del proceso.

Entre los resultados disponibles se encuentran:

- Flujo másico procesado.
- Temperatura y presión de alimentación.
- Temperaturas de salida de cada etapa.
- Presiones de salida de los equipos.
- Flujo de vapor utilizado en el UHT.
- Presión y temperatura del vapor.
- Flujo de agua de refrigeración.
- Temperatura de salida del agua.
- Diámetro interno del tubo.
- Largo del tubo.

- Tiempo de residencia.
- Retención de calidad por etapa.
- Calidad final.
- F_0 aportado por cada etapa.
- F_0 total del proceso.

Los resultados deben analizarse de forma integrada. En primer lugar, se debe comprobar que se hayan alcanzado las temperaturas objetivo. Posteriormente, se debe verificar el cumplimiento del criterio microbiológico, la conservación del atributo de calidad y la magnitud de los servicios requeridos.

También se debe revisar que el largo del tubo haya sido actualizado. Si el valor permanece constante después de modificar la temperatura, el flujo o el alimento, se debe comprobar la ejecución de C-RET y su posición dentro de la secuencia.

Los resultados globales de la interfaz pueden contrastarse con los cálculos detallados en las hojas de retención, regeneración y cooler. Esta revisión permite confirmar que los valores presentados corresponden a la última ejecución del modelo.

7.11. Evaluación económica

Los costos asociados al proceso pueden analizarse mediante Aspen Process Economic Analyzer. Esta herramienta utiliza las condiciones y los equipos definidos en la simulación para generar una estimación económica preliminar.

Entre los resultados que pueden consultarse se encuentran:

- Costo de adquisición de los equipos.
- Costo total instalado.
- Costo total de capital.
- Costos de operación.

- Costos de servicios auxiliares.
- Costos individuales de los equipos.

A continuación, en la Figura 45 se muestra la evaluación económica realizada en Aspen.

 Enabled by Aspen Process Economic Analyzer (APEA)	
Template: <Default> ▼	Save Save as new Reset Paste Send to Excel/ASW
Summary	Utilities Unit operation Equipment TEMA HEX Quoted equipment BPIPIPE
	▼
Total Capital Cost [USD]	1.860.670
Total Operating Cost [USD/Year]	954.442
Total Raw Materials Cost [USD/Year]	0
Total Product Sales [USD/Year]	0
Total Utilities Cost [USD/Year]	35.544,4
Desired Rate of Return [Percent/"Year]	20
P.O. Period [Year]	0
Equipment Cost [USD]	136.600
Total Installed Cost [USD]	472.400

Figura 45. Evaluación económica realizada en Aspen.

Los valores deben interpretarse como estimaciones de ingeniería y no como cotizaciones definitivas. Su precisión depende de la correcta clasificación de los equipos, de la disponibilidad de dimensiones y de la incorporación de los servicios utilizados.

Antes de comparar dos escenarios se debe comprobar que el análisis económico haya sido actualizado después de ejecutar cada simulación y que todos los casos utilicen la misma base de costos.

7.12. Consulta del diseño de los intercambiadores

El usuario puede revisar el diseño detallado de los intercambiadores mediante Aspen EDR.

Para acceder a esta información se debe:

1. Seleccionar el intercambiador dentro del flowsheet.
2. Abrir la ventana del equipo.
3. Ingresar a la opción EDR Browser.
4. Consultar las pestañas de diseño, geometría, resultados y perfiles térmicos.

Para el intercambiador de placas UHT se puede revisar:

- Número de placas.
- Área de transferencia.
- Dimensiones de las placas.
- Número de pasos.
- Velocidades de las corrientes.
- Coeficientes de transferencia.
- Caídas de presión.
- Factores de ensuciamiento.
- Materiales.
- Condiciones del producto y del vapor.

Para el regenerador y el cooler se pueden consultar:

- Diámetro de la coraza.
- Número y diámetro de tubos.
- Largo de los tubos.
- Número de pasos.
- Área de transferencia.

- Velocidades en tubos y coraza.
- Caídas de presión.
- Coeficientes térmicos.
- Temperaturas de proceso y servicio.
- Materiales de construcción.

También pueden revisarse los perfiles de temperatura y los datasheets de los equipos. Esta información permite relacionar la geometría propuesta con los resultados térmicos utilizados posteriormente en las hojas de cálculo.

7.13. Ejecución de un nuevo escenario

Para simular un nuevo caso se debe mantener abiertos los cuatro libros y seguir nuevamente el procedimiento:

1. Abrir la interfaz de C-PRINCE.
2. Modificar las condiciones de operación.
3. Seleccionar el alimento.
4. Seleccionar el parámetro de calidad.
5. Regresar a Aspen Plus.
6. Abrir C-PRINCE.
7. Cambiar temporalmente la opción de ejecución.
8. Volver a seleccionar Based on order in sequence.
9. Ejecutar la simulación.
10. Esperar la convergencia.
11. Revisar la interfaz principal.
12. Comprobar los cálculos detallados en las hojas correspondientes.

No es necesario cerrar y volver a abrir la simulación entre escenarios. Sin embargo, no se deben cerrar los libros de Excel ni alterar su orden mientras se utiliza el laboratorio virtual.

Antes de modificar nuevamente las condiciones, se recomienda guardar los resultados del caso anterior para facilitar su comparación.

7.14. Consideraciones para una operación correcta

Para evitar errores durante la utilización del laboratorio virtual se deben considerar las siguientes recomendaciones:

- Abrir obligatoriamente los libros en el orden C-PRINCE, C-RET, C-COOLER y C-REG.
- No ejecutar el modelo si alguno de los cuatro libros permanece cerrado.
- Mantener abiertas las hojas durante toda la simulación.
- Habilitar las macros de Excel.
- No cambiar los nombres de los bloques, archivos ni hojas vinculadas.
- Modificar únicamente las celdas habilitadas en la interfaz.
- Comprobar que el alimento y el parámetro de calidad se hayan actualizado.
- Reactivar la secuencia del Calculator principal antes de un nuevo caso.
- Esperar que la simulación converja completamente.
- Revisar que los Design Specs no alcancen sus límites de variación.
- Confirmar que el largo del tubo y los servicios respondan a los cambios realizados.
- Revisar los cálculos detallados antes de aceptar los resultados finales.
- Guardar los resultados antes de ejecutar un nuevo escenario.

La aplicación de este procedimiento permite operar el laboratorio virtual de manera ordenada, reproducible y comprensible. Su estructura facilita que distintos usuarios puedan

modificar las condiciones del proceso, observar los cálculos utilizados y analizar la relación existente entre inocuidad, calidad, requerimientos energéticos, diseño de equipos y costos.

8. CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

El presente trabajo permitió desarrollar un laboratorio virtual para el análisis integrado de procesos de esterilización continua de alimentos líquidos utilizando Aspen Plus V14. El modelo incorporó las principales etapas de un tren UHT indirecto: regeneración térmica, calentamiento mediante un intercambiador de placas, tubo de retención, regeneración de salida y enfriamiento final. Además, se integraron Aspen EDR, bloques Calculator y hojas de cálculo de Microsoft Excel, logrando relacionar los balances de masa y energía con cálculos específicos de inocuidad, calidad y dimensionamiento.

La metodología implementada permitió que variables como el flujo de vapor, el flujo de agua de refrigeración y el largo del tubo de retención fueran calculadas automáticamente a partir de las condiciones de operación. De esta manera, el modelo no quedó limitado a un caso estático, sino que fue capaz de responder ante cambios en el caudal, la temperatura objetivo y el alimento seleccionado.

Para el caso base de leche, la corriente ingresó al proceso a 5 °C y alcanzó una temperatura UHT de 145 °C. El tubo de retención presentó un diámetro interno de 108,2 mm, una longitud de 0,44 m y un tiempo de residencia de 0,62 s. Bajo los parámetros microbiológicos seleccionados, el tubo aportó un F_0 de 2,54 min, mientras que la letalidad total alcanzó 3,22 min al considerar la contribución adicional de la regeneración de salida. Esto demostró que la historia térmica del producto no se limita únicamente al tubo de retención, ya que las etapas posteriores pueden seguir contribuyendo al tratamiento microbiológico.

En cuanto a la calidad, para el parámetro de color o pardeamiento se obtuvo una retención final cercana al 45 %. El mayor deterioro ocurrió en el tubo de retención, debido a que el producto permaneció en esta etapa a la temperatura máxima del proceso. Este resultado confirmó la necesidad de analizar simultáneamente inocuidad y calidad, ya que una condición microbiológicamente segura puede producir una degradación importante del atributo evaluado.

El análisis de sensibilidad mostró que al aumentar la temperatura desde 135 hasta 145 °C el tiempo de residencia disminuyó desde 6,21 hasta 0,62 s y el largo del tubo se redujo desde 4,36 hasta 0,44 m. Al mismo tiempo, la calidad final aumentó desde 6,98 hasta 45 %, debido a

que la reducción del tiempo de exposición fue más importante que el aumento de temperatura para el parámetro cinético analizado. Este resultado evidenció el principio de alta temperatura y corto tiempo característico del tratamiento UHT.

Sin embargo, el aumento de temperatura también incrementó el consumo energético. El flujo de vapor aumentó desde 1.920 kg/h a 135 °C hasta 2.236 kg/h a 145 °C, mientras que la carga térmica del UHT aumentó desde 775,174 hasta 903,801 kW. En el cooler, el flujo de agua se mantuvo constante en 12.200 kg/h, pero su temperatura de salida y la carga térmica aumentaron al elevar la temperatura del proceso.

En términos generales, el laboratorio virtual cumplió su propósito técnico y pedagógico, al permitir visualizar la relación entre temperatura, tiempo de residencia, inocuidad, calidad, energía, diseño y costos. No obstante, sus resultados deben interpretarse dentro de las limitaciones del modelo estacionario, la representación simplificada de la leche y los parámetros cinéticos seleccionados, por lo que no reemplazan una validación microbiológica o industrial.

8.2. Recomendaciones

Como primera recomendación, se propone validar las propiedades termofísicas calculadas para la leche virtual mediante su comparación con correlaciones o datos experimentales. Las variables prioritarias corresponden a densidad, capacidad calorífica, viscosidad y conductividad térmica, debido a que influyen directamente sobre los balances energéticos, las velocidades, los tiempos de residencia y el diseño de los intercambiadores.

También se recomienda revisar los parámetros microbiológicos y de calidad utilizados para cada alimento. Los valores de D_{ref} , z , temperatura de referencia y F_0 dependen de la composición, el pH, la actividad de agua y el microorganismo o atributo seleccionado. Por esta razón, los parámetros utilizados para la leche no deben aplicarse directamente a otros productos sin una revisión bibliográfica o experimental.

El cálculo de inocuidad y calidad debería ampliarse para incorporar de manera explícita el perfil térmico dentro del intercambiador UHT. En el modelo actual, la principal contribución se calcula en el tubo de retención, la regeneración y el cooler, pero la etapa de calentamiento desde 70 °C hasta la temperatura objetivo también puede aportar letalidad y deterioro.

Respecto del tubo de retención, se recomienda complementar el criterio basado en la partícula más rápida con una distribución de tiempos de residencia más representativa. La incorporación de modelos de dispersión axial, datos experimentales o simulaciones CFD permitiría evaluar desviaciones respecto del perfil ideal. También sería conveniente establecer un tiempo mínimo de retención, especialmente para condiciones como 145 °C, donde el modelo obtuvo 0,62 s.

El análisis de sensibilidad debería extenderse a otras variables, como el flujo de alimentación, el diámetro del tubo, la temperatura de entrada, el nivel de regeneración, la presión y los factores de ensuciamiento. Esto permitiría determinar cuáles variables tienen mayor influencia sobre la inocuidad, la calidad y el consumo energético.

Desde el punto de vista económico, se recomienda corregir la clasificación del intercambiador UHT, incorporar el costo del tubo de retención y considerar de forma diferenciada los costos de vapor, agua de refrigeración y electricidad. La evaluación actual permite comparar tendencias, pero no constituye todavía un análisis completo de rentabilidad.

También se propone mejorar la automatización entre Aspen Plus y Excel. Actualmente, las hojas de cálculo deben abrirse en un orden específico y la secuencia del Calculator principal debe reactivarse manualmente. Una versión futura podría consolidar los cálculos en un solo archivo, automatizar la apertura de los libros e incorporar alertas cuando un Design Spec alcance sus límites o cuando la simulación no entregue resultados consistentes.

Como desarrollo posterior, sería útil convertir el modelo a régimen dinámico. Esto permitiría estudiar arranques, detenciones, fallas de vapor, pérdida de agua de refrigeración y desviaciones de temperatura, además de implementar una lógica de desviación automática del producto cuando no se cumpla el criterio de inocuidad.

Finalmente, se recomienda aplicar el laboratorio virtual en actividades académicas y evaluar formalmente su impacto pedagógico. La herramienta puede utilizarse para analizar distintos alimentos, comparar condiciones de operación y discutir el compromiso entre inocuidad, calidad, energía y costos, fortaleciendo la comprensión integrada de los procesos térmicos de alimentos.

BIBLIOGRAFIA

- Anema, S. G. (2019). Age gelation, sedimentation, and creaming in UHT milk: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 140-166.
- Aspen Technology, Inc. (2025). *Aspen HYSYS Dynamics*. Obtenido de <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-hysys-dynamics>
- Aspen Technology, Inc. (s.f.). *Getting Started with Exchanger Design and Rating in Aspen HYSYS*. Obtenido de https://aspentechsupport.blob.core.windows.net/cbt/Getting%20Started%20with%20Exchanger%20Design%20and%20Rating%20in%20Aspen%20HYSYS/presentation_html5.html
- Bansal, B., & Chen, X. D. (2006). A critical review of milk fouling in heat exchange. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 27-33.
- Boekel, M. A. (1998). Effect of heating on Maillard reactions in milk. *Food Chemistry*, 403-414.
- Burton, H. (1988). *Ultra-high-temperature processing of milk and milk products*. Londres: Elsevier Applied Science.
- Chavan, R. S., Chavan, S. R., Khedkar, C. D., & Jana, A. H. (2011). UHT milk processing and effect of plasmin activity on shelf life: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 251-268.
- Chhabra, R., & Patel, S. (2025). *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. Amsterdam: Elsevier.
- Codex Alimentarius Commission. (1993). *Code of hygienic practice for aseptically processed and packaged low-acid foods*. FAO/WHO.
- Deeth, H. (2021). Effects of high-temperature milk processing. *Encyclopedia*, 1312–1321.
- Deeth, H., & Datta, N. (s.f.). Age gelation of UHT milk—A review. *Food and Bioproducts Processing*, 197-210.

- Holdsworth, S. D. (1992). *Aseptic Processing and Packaging of Food Products*. London: Chapman & Hall.
- Holdsworth, S., & Simpson, R. (2016). *Thermal processing of packaged foods*. Springer.
- Ma, J., & Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Computing Surveys*.
- Mehta, R. S. (1980). Milk processed at ultra-high-temperatures-A review. *Journal of Food Protection*, 212-225.
- Munir, M., Zhang, Y., Yu, W., Wilson, D., & Young, B. (2016). Virtual milk for modelling and simulation of dairy processes. *Journal of Dairy Science*, 3380–3395.
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*, 309-327.
- Simpson, R., Nuñez, H., & Ramírez, C. (2020). Principles of thermal processing of packaged foods. En *Introduction to Biosystems Engineering*. Virginia Tech Publishing; ASABE. Obtenido de <https://vtchworks.lib.vt.edu/server/api/core/bitstreams/096c9095-c68f-4d99-89d6-69bb4ab932fe/content>
- Singh, R., & Heldman, D. (2014). *Introduction to food engineering*. San Diego: Academic Press.
- Tetra Pak. (2025). *Dairy Processing Handbook*. Tetra Pak.
- U.S. Food and Drug Administration. (16 de April de 1984). *Water activity (aw) in foods*. Obtenido de U.S. Food and Drug Administrationv: https://www.fda.gov/inspections-compliance-enforcement-and-criminal-investigations/inspection-technical-guides/water-activity-aw-foods?utm_source
- van Boekel, M. A. (2008). Kinetic modeling of food quality: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 144-158.
- Visser, J., & Jeurink, T. J. (1997). Fouling of heat exchangers in the dairy industry. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 407-424.

World Health Organization. (s.f.). *Food safety*. Obtenido de World Health Organization:
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>

ANEXOS

Anexo 1: Overall Performance UHT caso base.

Overall Performance

Design		Hot Side		Cold Side	
Total mass flow rate	kg/h	3000		10143	
Vapor mass flow rate (In/Out)	kg/h	3000	1456	0	0
Liquid mass flow rate	kg/h	0	1544	10143	10143
Vapor mass quality		1	0,4854937	0	0
Temperatures	°C	151,92	151,9	70	145
Dew / Bubble point	°C	151,92	151,9		
Pressure (abs)	bar	5	4,99826	4,92954	4,92942
Heat transfer coeff. (mean)	W/(m²-K)	16155,9		407,6	
Fouling resistance	m²-K/W	5E-05		0,0002	
Velocity (Port/Plate)	m/s	6,66	/ 1	0,07	/ 0,01
Wall shear stress (mean)	N/m²	0,15		0,01	
Pressure drop (allow./calc.)	bar	0,00174	/ 0,00174	0,69	/ 0,00012
Residence volume	m³	0,7501		0,7501	
Residence time	Seconds	3,09		239,41	
Total heat exchanged	W	903801		Exchangers	1
Overall coef. (dirty/clean)	W/(m²-K)	356,8	/ 391,8	Plates	193
Effective surface area	m²	275,6		Passes - hot / cold	1 / 1
Overall effective MTD	°C	30,34		Channels - hot / cold	96 / 96
Actual/Reqd. area (dirty/clean)		3,3	/ 3,62	Plate - length / width	m 2,2599 / 0,725
Actual/Reqd. area (incl. fouling margin)				Plate - pitch / thk	m 0,0053 / 0,0006
Risk of maldistribution	No			Port diameter	m 0,25
				Chevron Angle	Degrees 60

Heat Transfer Resistance

Hot side / Fouling / Wall / Fouling / Cold side

Hot side  Cold side

Anexo 2: DataSheet UHT caso base.

Plate Heat Exchanger Specification Sheet

1	Company:				
2	Location:				
3	Service of Unit:		Our Reference:		
4	Item No.:		Your Reference:		
5	Date:	Rev No.:	Job No.:		
6	CASE		HOT SIDE		COLD SIDE
7	Fluid		vapor		Leche
8	Total flow	kg/h	3000		10143
9	Flow per PHE	kg/h	3000		10143
10	Pressure drop (allow./calc.)	bar	0,00174 / 0,00174		0,69 / 0,00012
11	Velocity between plates	m/s	1		0,01
12	Wall shear stress	N/m ²	0,15		0,01
13	Fouling margin	%			
14	OPERATING DATA		INLET	OUTLET	
15	Liquid flow	kg/h	0	1544	10143
16	Vapor flow	kg/h	3000	1456	0
17	Operating temperature	°C	151,92	151,9	70
18	Operating pressure	bar	5	4,99826	4,92954
19	LIQUID PROPERTIES				
20	Density	kg/m ³		860,99	941,65
21	Specific heat	kJ/(kg-K)		5,101	4
22	Viscosity	cp		0,1771	0,4173
23	Thermal conductivity	W/(m-K)		0,6851	0,3413
24	Surface tension	N/m		0,0483	0,0645
25	VAPOR PROPERTIES				
26	Density	kg/m ³	2,55	2,55	
27	Specific heat	kJ/(kg-K)	1,914	1,914	
28	Viscosity	cp	0,0145	0,0145	
29	Thermal conductivity	W/(m-K)	0,0292	0,0292	
30	Relative molecular mass		18,01528	18,01528	
31	Dew point / bubble point	°C	151,92 / 151,9		/
32	Latent heat	kJ/kg	2107,9		
33	Critical pressure	bar			
34	Critical temperature	°C			
35	Total heat exchanged	W	903801		
36	Overall coefficient (U)	W/(m ² -K)	Clean condition:	391,8	Service: 356,8
37	LMTD / Effective MTD	°C	30,34 / 30,34		
38	Heat transfer area	m ²	275,6		
39	Stream heat transfer coeff.	W/(m ² -K)	16155,9		407,6
40	CONFIGURATION FOR EXCHANGER AND PLATE DETAILS				
41	Number of PHE in parallel	1	Heat transfer area/PHE	m ²	275,6
42	Number of passes, hot side	1	Heat transfer area/plate	m ²	1,443
43	Number of passes, cold side	1	Plate chevron angles(s)	Degrees	60
44	Number of plates per PHE	193	Nominal plate thickness	m	0,0006
45			Nominal plate gap	m	0,0047
46	Mass empty / full of water	kg	1375,4 / 2875,5		
47	Remarks:				
48					
49					
50					

Anexo 3: Overall Performance Regeneración caso base.

Overall Performance

Rating / Checking		Shell Side		Tube Side	
Total mass flow rate	kg/h	10143		10143	
Vapor mass flow rate (In/Out)	kg/h	0	0	0	0
Liquid mass flow rate	kg/h	10143	10143	10143	10143
Vapor mass fraction		0	0	0	0
Temperatures	°C	5	70	145	87,45
Bubble / Dew point	°C	/	/	/	/
Operating Pressures	bar	5	4,92954	4,92902	4,72095
Film coefficient	W/(m²-K)	4185,7		6305,4	
Fouling resistance	m²-K/W	0,0003		6E-05	
Velocity (highest)	m/s	0,36		2,1	
Pressure drop (allow./calc.)	bar	0,34	/ 0,07046	0,26	/ 0,20808
Total heat exchanged	MW	0,704		Unit BEM 4 pass 1 ser 1 par	
Overall clean coeff. (plain/finned)	W/(m²-K)	1948,2 /		Shell size 8,0709 - 47,2441 in Hor	
Overall dirty coeff. (plain/finned)	W/(m²-K)	1144,5 /		Tubes Plain	
Effective area (plain/finned)	m²	2,3 /		Insert None	
Effective MTD	°C	70,11		No. 34 OD 0,75 Tks 0,065 in	
Actual/Required area ratio (dirty/clean)		0,26 / 0,44		Pattern 30 Pitch 0,9375 in	
Vibration problem (HTFS)		No		Baffles Single segmental Cut(%d) 32,96	
TEMA RhoV2 limit exceeded		No		Total cost 13346 Dollar(US)	

Total Messages: 9

Errors: 0

Input: 3

Results: 0

Operations: 1

Notes & Advisory: 5

Warning and Messages details

Heat Transfer Resistance

Shell side / Fouling / Wall / Fouling / Tube side

Shell Side  Tube Side

Anexo 4: DataSheet regeneración caso base.

Heat Exchanger Specification Sheet										
1	Company:									
2	Location:									
3	Service of Unit:				Our Reference:					
4	Item No.:				Your Reference:					
5	Date:		Rev No.:		Job No.:					
6	Size: 8,0709 - 47,2441		in		Type:	BEM Horizontal		Connected in: 1 parallel 1 series		
7	Surf/unit(eff.)		24,6 ft²		Shells/unit	1		Surf/shell(eff.) 24,6 ft²		
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT									
9	Fluid allocation				Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name				7			5		
11	Fluid quantity, Total				kg/h 10143			10143		
12	Vapor (In/Out)				kg/h 0 0			0 0		
13	Liquid				kg/h 10143 10143			10143 10143		
14	Noncondensable				kg/h 0 0			0 0		
15										
16	Temperature (In/Out)				°C 5 70			145 87,45		
17	Bubble / Dew point				°C / /			/ /		
18	Density Vapor/Liquid				kg/m³ / 1005,59 / 941,65			/ 860,62 / 923,59		
19	Viscosity				cp / 1,5169 / 0,4173			/ 0,19 / 0,3307		
20	Molecular wt. Vap									
21	Molecular wt. NC									
22	Specific heat				kJ/(kg-K) / 3,727 / 4			/ 4,619 / 4,111		
23	Thermal conductivity				W/(m-K) / 0,362 / 0,3413			/ 0,2869 / 0,3314		
24	Latent heat				kJ/kg					
25	Pressure (abs)				bar 5 4,92954			4,92902 4,72095		
26	Velocity (Mean/Max)				m/s 0,34 / 0,36			1,91 / 2,1		
27	Pressure drop, allow./calc.				bar 0,34 0,07046			0,26 0,20808		
28	Fouling resistance (min)				m²-K/W 0,0003			5E-05 6E-05 Ao based		
29	Heat exchanged 0,704 MW				MTD (corrected) 70,11 °C					
30	Transfer rate, Service 4397,2 Dirty 1144,5 Clean 1948,2 W/(m²-K)									
31	CONSTRUCTION OF ONE SHELL									
32					Shell Side			Tube Side		
33	Design/Vacuum/test pressure:g bar				6 / /			6 / /		
34	Design temperature / MDMT °C				95 /			165 /		
35	Number passes per shell				1			4		
36	Corrosion allowance m				0			0		
37	Connections		In m		1 0,0525 / -			1 0,0409 / -		
38	Size/Rating		Out		1 0,0409 / -			1 0,0409 / -		
39	ID		Intermediate		/ -			/ -		
40	Tube #: 34 OD: 1,905 Tks. Average 0,1651 cm Length: 120 cm Pitch: 0,0238 m Tube pattern:30									
41	Tube type: Plain				Insert:None			Fin#: #/m Material:SS 316L		
42	Shell SS 316L ID 20,5003 OD 21,9075 cm				Shell cover -					
43	Channel or bonnet SS 316L				Channel cover -					
44	Tubesheet-stationary SS 316L -				Tubesheet-floating -					
45	Floating head cover -				Impingement protection None					
46	Baffle-cross SS 316L Type Single segmental Cut(%d) 32,96				HorizSpacing: c/c 9 cm					
47	Baffle-long - Seal Type				Inlet 6,1605 in					
48	Supports-tube U-bend 0				Type					
49	Bypass seal				Tube-tubesheet joint			Expanded only (2 grooves)(App.A Y)		
50	Expansion joint -				Type None					
51	RhoV2-Inlet nozzle 1132				Bundle entrance 149			Bundle exit 71 lb/(ft-s²)		
52	Gaskets - Shell side -				Tube side			Flat Metal Jacket Fibe		
53	Floating head -									
54	Code requirements ASME Code Sec VIII Div 1				TEMA class R - refinery service					
55	Weight/Shell 450,9 Filled with water 538,1				Bundle 149,1			lb		
56	Remarks									
57										
58										



Anexo 5: Overall Performance Cooler caso base.

Overall Performance

Design (Sizing)		Shell Side		Tube Side	
Total mass flow rate	kg/h	12200		10143	
Vapor mass flow rate (In/Out)	kg/h	0	0	0	0
Liquid mass flow rate	kg/h	12200	12200	10143	10143
Vapor mass fraction		0	0	0	0
Temperatures	°C	2	62,44	87,45	10
Bubble / Dew point	°C	/	/	/	/
Operating Pressures	bar	5	4,57192	4,72095	4,66775
Film coefficient	W/(m²-K)	3835,7		1111,1	
Fouling resistance	m²-K/W	5E-05		0,00036	
Velocity (highest)	m/s	0,31		0,33	
Pressure drop (allow./calc.)	bar	0,5	/ 0,42807	0,26	/ 0,05319
Total heat exchanged	MW	0,851		Unit BEM 1 pass 6 ser 1 par	
Overall clean coeff. (plain/finned)	W/(m²-K)	778,1	/	Shell size 8,4252	- 196,8504 in Hor
Overall dirty coeff. (plain/finned)	W/(m²-K)	588,9	/	Tubes Plain	
Effective area (plain/finned)	m²	83,3	/	Insert None	
Effective MTD	°C	15,21		No. 47 OD 1,905	Tks 0,1651 cm
Actual/Required area ratio (dirty/clean)		0,88	/ 1,16	Pattern 30	Pitch 2,3812 cm
Vibration problem (HTFS)		No		Baffles Single segmental	Cut(%d) 40,34
TEMA RhoV2 limit exceeded		No		Total cost	111480 Dollar(US)

Total Messages: 15
 Errors: 0
 Input: 6
 Results: 1
 Operations: 4
 Notes & Advisory: 4
 Warning and Messages details

Heat Transfer Resistance

Shell side / Fouling / Wall / Fouling / Tube side

Shell Side  Tube Side

Anexo 6: DataSheet cooler caso base.

Heat Exchanger Specification Sheet									
1	Company:								
2	Location:								
3	Service of Unit:				Our Reference:				
4	Item No.:				Your Reference:				
5	Date:	Rev No.:	Job No.:						
6	Size: 8,4252 - 196,850		in	Type:	BEM	Horizontal	Connected in:	1 parallel	6 series
7	Surf/unit(eff.)	83,3	m²	Shells/unit	6	Surf/shell(eff.)	13,9	m²	
8	PERFORMANCE OF ONE UNIT								
9	Fluid allocation			Shell Side			Tube Side		
10	Fluid name			15			9		
11	Fluid quantity, Total			kg/h			12200		
12	Vapor (In/Out)			kg/h			0		
13	Liquid			kg/h			12200		
14	Noncondensable			kg/h			0		
15									
16	Temperature (In/Out)			°C			62,44		
17	Bubble / Dew point			°C			/		
18	Density Vapor/Liquid			kg/m³			/ 1015,88		
19	Viscosity			cp			/ 1,6098		
20	Molecular wt, Vap								
21	Molecular wt, NC								
22	Specific heat			kJ/(kg-K)			/ 4,05		
23	Thermal conductivity			W/(m-K)			/ 0,5706		
24	Latent heat			kJ/kg					
25	Pressure (abs)			bar			5		
26	Velocity (Mean/Max)			m/s			0,28 / 0,31		
27	Pressure drop, allow./calc.			bar			0,5		
28	Fouling resistance (min)			m²-K/W			5E-05		
29	Heat exchanged			0,851			MW		
30	Transfer rate, Service			118,31			Dirty		
31				103,71			Clean		
32				137,03			BTU/(h-ft²-F)		
33	CONSTRUCTION OF ONE SHELL								
34	Design/Vacuum/test pressure:g			bar			0 / /		
35	Design temperature / MDMT			°C			-273,15 /		
36	Number passes per shell						1		
37	Corrosion allowance			m			0		
38	Connections			In			m		
39	Size/Rating			Out			1 0,0762 / -		
40	Nominal			Intermediate			1 0,0762 / -		
41	Tube #:			47			OD: 0,75		
42	Tube type:			Plain			Insert:None		
43	Shell			SS 316L			ID 21,3538		
44	Channel or bonnet			SS 316L			OD 21,9075		
45	Tubesheet-stationary			SS 316L			-		
46	Floating head cover			-			-		
47	Baffle-cross			SS 316L			Type Single segmental		
48	Baffle-long			-			Seal Type		
49	Supports-tube			U-bend			0		
50	Bypass seal			-			Tube-tubesheet joint		
51	Expansion joint			-			Type None		
52	RhoV2-Inlet nozzle			334			Bundle entrance		
53	Gaskets - Shell side			-			Tube side		
54	Floating head			-			Flat Metal Jacket Fibe		
55	Code requirements			ASME Code Sec VIII Div 1			TEMA class		
56	Weight/Shell			874,7			Filled with water		
57	Remarks								
58									

Anexo 7: Construcción Proceso de esterilización continua de Leche.

☒ Mixed
 ☐ CI Solid
 ☐ NC Solid
 ☐ Flash Options
 ☐ EO Options
 ☐ Costing
 ☐ Comments

Specifications

 Component Attributes
 Particle Size Distribution

Flash Type: **Temperature** **Pressure**

State variables:

Temperature	20	C
Pressure	5	bar
Vapor fraction		
Total flow basis	Mass	
Total flow rate	12000	kg/hr
Solvent		

Reference Temperature:

Volume flow reference temperature	C
Component concentration reference temperature	C

Composition: **Mass-Flow** **kg/hr**

Component	Value
WATER	0,8
POTAS	0,0013
CALCI	0,0011
M-OLEIC	0,0159
M-N-HEX	0,0191
M-LACTO	0,049
M-GLUTA	0,022
N-SUCRO	
N-GLUCO	
N-FRUCTO	
N-A-CITR	
N-A-ASC	
MALIC-01	
SODIU-01	
Total	0,9084

Figura 46. caracterización corriente de entrada a proceso.

UHT (HeatX) x B6 x Main Flowsheet x REG (HeatX) - EDR Browser x COOLER (HeatX) - EDR Browser x C-PRINC x

Specifications Streams LMTD Pressure Drop U Methods Film Coefficients Utilities Comments

Model fidelity

☐ Shortcut
☐ Detailed
☐ Shell & Tube
☐ Kettle Reboiler
☐ Thermosyphon
☐ Air Cooled
☒ Plate

Hot fluid

☒ Shell
☐ Tube

Shortcut flow direction

☒ Countercurrent
☐ Cocurrent
☐ Multipass, calculate number of shells
☐ Multipass, shells in series 1

Calculation mode **Design**

Exchanger specification

Specification **Cold stream outlet temperature**

Value 135 C

Exchanger area sqm Copy calculated area to input

Constant UA cal/sec-K Copy calculated UA to input

Minimum temperature approach 1 C

Size Exchanger Specify Geometry Results

Figura 47. Especificación del intercambiador de placas.

Mixed CI Solid NC Solid Flash Options EO Options Costing Comments

Specifications

Flash Type **Pressure** **Vapor Fraction**

State variables

Temperature 152 C
 Pressure 5 bar
 Vapor fraction 1
 Total flow basis **Mass**
 Total flow rate 8000 kg/hr
 Solvent

Reference Temperature

Volume flow reference temperature C
 Component concentration reference temperature C

Composition

Mole-Flow kmol/hr

Component	Value
WATER	1
POTAS	
CALCI	
M-OLEIC	
M-N-HEX	
M-LACTO	
M-GLUTA	
N-SUCRO	
N-GLUCO	
N-FRUCTO	
N-A-CITR	
N-A-ASC	
MALIC-01	
SODIU-01	
Total	1

Figura 48. caracterización del flujo de servicio del intercambiador de placas.

Define Spec Vary Fortran Declarations EO Options Comments

☒ Active

Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Definition
VAP	Block-Var Block=UHT Variable=COLD-TEMP Sentence=STREAM-PROP Units=C
TEMPOBJ	Block-Var Block=UHT Variable=T-COLD Sentence=PARAM Units=C
*	

New Delete Copy Paste Move Up Move Down View Variables

Edit selected variable

Variable: **TEMPOBJ**

Category:

- ☐ All
- ☒ Blocks
- ☐ Streams
- ☐ Model Utility
- ☐ Property Parameters
- ☐ Reactions

Reference:

Type: **Block-Var**

Block: **UHT**

Variable: **T-COLD**

Sentence: **PARAM**

Units: **C**

EO input

Open variable:

Description:

Figura 49. pestaña define construcción Design Specs del intercambiador de placas.

Define Spec Vary Fortran Declarations EO Options Comments

Design specification expressions

Spec	VAP
Target	TEMPOBJ
Tolerance	0,01

Figura 50. Pestaña spec construcción Design Specs del intercambiador de placas.

☒ Define
 ☒ Spec
 ☒ **Vary**
 Fortran
 Declarations
 EO Options
 Comments

Manipulated variable

Type: **Stream-Var**

Stream: **10**

Substream: **MIXED**

Variable: **MASS-FLOW**

Units: **kg/hr**

Manipulated variable limits

Lower: **2000**

Upper: **2900**

Step size:

Maximum step size:

Report labels

Line 1	Line 2	Line 3	Line 4

EO input

Open variable:

Description:

Copy
 Paste
 Clear

Figura 51. pestaña vary construcción Design Specs del intercambiador de placas.

☒ **Pipe Parameters**
☒ Thermal Specification
 Fittings1
 Fittings2
 Flash Options
 Solids Conveying
 Comments

☒ Fluid flow
☐ Solids conveying

Length

Pipe length: **2** **meter**

Diameter

☐ Inner diameter: **0,108204** **meter**
☒ Use pipe schedules
☐ Compute using user subroutine

Pipe schedules

Material: **CARBON-STEEL**

Schedule: **10**

Nom diameter: **4-IN**

Elevation

☒ Pipe rise: **0** **meter**
☐ Pipe angle: **deg**

Options

Roughness: **4,572e-05** **meter**

Erosional velocity coefficient: **100**

Figura 52. caracterización segmento de tubería (tubo de retención).

☒ Pipe Parameters
 ☒ Thermal Specification
 ☐ Fittings1
 ☐ Fittings2
 ☐ Flash Options
 ☐ Solids Conveying
 ☐ Corrosion

Thermal specification type

☐ Constant temperature
 ☐ Linear temperature profile
 ☒ Adiabatic (zero duty)
 ☐ Perform energy balance

Outlet temperature

C

☒ Include energy balance parameters
 ☒ Include heat flux

Energy balance parameters

Inlet ambient temperature

C

Outlet ambient temperature

C

Heat transfer coefficient

kcal/hr-sqm-K

Heat flux

cal/sec-m

Figura 53. caracterización térmica del segmento de tubería.

Define Calculate Sequence Tears Stream Flash Comments

☒ Active

^ Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Information flow	Definition
TEMP	Import variable	Stream-Var Stream=3 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
DIAM	Import variable	Block-Var Block=RET Variable=IN-DIAM Sentence=PARAM Units=meter
DENS	Import variable	Stream-Var Stream=3 Substream=MIXED Variable=MASS-DENSITY Units=kg/cum
LTUBO	Export variable	Block-Var Block=RET Variable=LENGTH Sentence=PARAM Units=meter
VELO	Import variable	Block-Var Block=RET Variable=PROF-VELOC Sentence=PROFILES ID1=1 Units=m/sec
Q	Import variable	Stream-Var Stream=3 Substream=MIXED Variable=MASS-FLOW Units=kg/sec
*		

New Delete Copy Paste Move Up Move Down View Variables

^ Edit selected variable

Variable: **TEMP**

Category:

- ☐ All
- ☐ Blocks
- ☒ Streams
- ☐ Model Utility
- ☐ Property Parameters
- ☐ Reactions

Reference:

Type: **Stream-Var**

Stream: **3**

Substream: **MIXED**

Variable: **TEMP**

Units: **C**

Information flow:

- ☒ Import variable
- ☐ Export variable
- ☐ Tear variable

EO input

Open variable:

Description:

Figura 54. Variables importadas y exportadas calculador del tubo de retención.

Define Calculate Sequence Tears Stream Flash Comments

Calculator block execution sequence

Execute: **Before** Block type: **Unit operation** Block name: **RET**

List variables as import or export

Import variables:

TEMP	DIAM	DENS	VELO	Q
------	------	------	------	---

Export variables:

LTUBO

Figura 55. pestaña sequence del calculador del tubo de retención.

REG (HeatX) x Main Flowsheet x REG (HeatX) - EDR Browser x COOLER (HeatX) - EDR Browser x C-PRINC x C-RET x C

☒ Specifications Streams LMTD Pressure Drop U Methods Film Coefficients Utilities Comments

Model fidelity

☐ Shortcut

☐ Detailed

☒ Shell & Tube

☐ Kettle Reboiler

☐ Thermosyphon

☐ Air Cooled

☐ Plate

Hot fluid

☐ Shell

☒ Tube

Shortcut flow direction

☒ Countercurrent

☐ Cocurrent

☐ Multipass, calculate number of shells

☐ Multipass, shells in series 1

Calculation mode Rating

Exchanger specification

Specification Cold stream outlet temperature

Value 70 C

Exchanger area sqm Copy calculated area to input

Constant UA cal/sec-K Copy calculated UA to input

Minimum temperature approach 1 C

Size Exchanger Specify Geometry Results

Figura 56. Especificación del intercambiador de regeneración.

Define Calculate Sequence Tears Stream Flash Comments

☒ Active

^ Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Information flow	Definition
▶ VELIN	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=T-INLET-VL Sentence=TUBE-RESULT Units=m/sec
▶ VELOUT	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=T-OUTLET-VL Sentence=TUBE-RESULT Units=m/sec
▶ TIN	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=HOTINT Sentence=STREAM-PROP Units=C
▶ TOUT	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=HOT-TEMP Sentence=STREAM-PROP Units=C
▶ Q	Import variable	Stream-Var Stream=4 Substream=MIXED Variable=MASS-FLOW Units=kg/sec
▶ DENS	Import variable	Stream-Var Stream=4 Substream=MIXED Variable=MASS-DENSITY Units=kg/cum
▶ VSHELL	Import variable	Block-Var Block=REG Variable=S-WINDOW-VL Sentence=SHELL-RESULT Units=m/sec
▶ TINSHELL	Import variable	Stream-Var Stream=1 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
▶ TOUTSHEL	Import variable	Stream-Var Stream=2 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
*		

New Delete Copy Paste Move Up Move Down View Variables

^ Edit selected variable

Variable: **VELIN**

Category:

- ☒ All
- ☐ Blocks
- ☐ Streams
- ☐ Model Utility
- ☐ Property Parameters
- ☐ Reactions

Reference:

Type: **Block-Var**

Block: **REG**

Variable: **T-INLET-VL**

Sentence: **TUBE-RESULT**

Units: **m/sec**

Information flow:

- ☒ Import variable
- ☐ Export variable
- ☐ Tear variable

EO input

Open variable:

Description:

Figura 57. Variables importadas y exportadas calculador del intercambiador de regeneración.

Define Calculate Sequence Tears Stream Flash Comments

Calculator block execution sequence

Execute: **Use import/export variables** Block type: Block name:

List variables as import or export

Import variables:

▶	VELIN	VELOUT	TIN	TOUT	Q	DENS	VSHELL	TINSHELL	TOUTSHEL
---	-------	--------	-----	------	---	------	--------	----------	----------

Export variables:

▶	
---	--

Figura 58. pestaña sequence del calculador del intercambiador de regeneración.

SPLIT (FSplit) x Main Flowsheet x REG (HeatX) - EDR Browser x COOLER (HeatX) - EDR Browser x C-PRINC x C-RET x C-COOLER x C-REG x							
Specifications Flash Options Key Components Comments							
Flow split specification for outlet streams							
Stream	Specification	Basis	Value	Units	Key Comp No	Stream order	
6						2	
7	Split fraction		1			1	

Figura 59. Configuración Split.

Define
Calculate
Sequence
Tears
Stream Flash
Comments

☒ Active

Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Information flow	Definition
T	Import variable	Stream-Var Stream=3 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
F	Export variable	Block-Var Block=SPLIT Variable=FLOW/FAC Sentence=FLOW/FAC ID1=7
*		

New
Delete
Copy
Paste
Move Up
Move Down
View Variables

Edit selected variable

Variable: T

Category:

All
Blocks
Streams
Model Utility
Property Parameters
Reactions

Reference:

Type: Stream-Var
Stream: 3
Substream: MIXED
Variable: TEMP
Units: C

Information flow:

☒ Import variable
☐ Export variable
☐ Tear variable

EO input:

Open variable:
Description:

Figura 60. Variable exportada e importada en calculator para controlar Split.

Define
Calculate
Sequence
Tears
Stream Flash
Comments

Calculation method:

☒ Fortran
☐ Excel
☐ Neural Network

Fortran Declarations

Enter executable Fortran statements

```

IF (T .LT. 130) THEN
  F=1
ELSE
  F=1
ENDIF

```

Figura 61. Código para controlar Split.

Define Calculate **Sequence** Tears Stream Flash Comments

Calculator block execution sequence

Execute: **After** Block type: **Unit operation** Block name: **RET**

List variables as import or export

Import variables: **T**

Export variables: **F**

Figura 62. Pestaña sequence del calculator del Split.

Specifications Streams LMTD Pressure Drop U Methods Film Coefficients Utilities Comments

Model fidelity

- ☐ Shortcut
- ☐ Detailed
- ☒ Shell & Tube
- ☐ Kettle Reboiler
- ☐ Thermosyphon
- ☐ Air Cooled
- ☐ Plate

Hot fluid

- ☐ Shell
- ☒ Tube

Shortcut flow direction

- ☒ Countercurrent
- ☐ Cocurrent
- ☐ Multipass, calculate number of shells
- ☐ Multipass, shells in series: **1**

Calculation mode: **Design**

Exchanger specification

Specification: **Hot stream outlet temperature**

Value: **20** **C**

Exchanger area: **sqm** **Copy calculated area to input**

Constant UA: **cal/sec-K** **Copy calculated UA to input**

Minimum temperature approach: **1** **C**

Size Exchanger **Specify Geometry** **Results**

Figura 63. Especificación del intercambiador de refrigeración.

Mixed

CI Solid

NC Solid

Flash Options

EO Options

Costing

Comments

Specifications

Flash Type

Temperature

Pressure

State variables

Temperature

2

C

Pressure

5

bar

Vapor fraction

Total flow basis

Mass

Total flow rate

kg/hr

Solvent

Reference Temperature

Volume flow reference temperature

C

Component concentration reference temperature

C

Composition

Mole-Flow

kmol/hr

Component	Value
WATER	1
POTAS	
CALCI	
M-OLEIC	
M-N-HEX	
M-LACTO	
M-GLUTA	
N-SUCRO	
N-GLUCO	
N-FRUCTO	
N-A-CITR	
N-A-ASC	
MALIC-01	
SODIU-01	
Total	1

Figura 64. caracterización del flujo de servicio del intercambiador de refrigeración previo a design spec.

Define Calculate Sequence Tears Stream Flash Comments

☒ Active

Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Information flow	Definition
VIN	Import variable	Block-Var Block=COOLER Variable=T-INLET-VL Sentence=TUBE-RESULT Units=m/sec
VOUT	Import variable	Block-Var Block=COOLER Variable=T-OUTLET-VL Sentence=TUBE-RESULT Units=m/sec
TIN	Import variable	Stream-Var Stream=7 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
TOUT	Import variable	Stream-Var Stream=8 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
*		

New Delete Copy Paste Move Up Move Down View Variables

Edit selected variable

Variable: **VIN**

Category:

- All
- Blocks**
- Streams
- Model Utility
- Property Parameters
- Reactions

Reference:

Type: **Block-Var**

Block: **COOLER**

Variable: **T-INLET-VL**

Sentence: **TUBE-RESULT**

Units: **m/sec**

Information flow:

- Import variable**
- Export variable
- Tear variable

EO input

Open variable:

Description:

Figura 65. Variables importadas para calculador del intercambiador de refrigeración.

Define Calculate Sequence Tears Stream Flash Comments

Calculator block execution sequence

Execute: **Use import/export variables** Block type: Block name:

List variables as import or export

Import variables:

VIN	VOUT	TIN	TOUT
-----	------	-----	------

Export variables:

--	--

Figura 66. Sequence para el calculador del intercambiador de refrigeración.

Define Spec Vary Fortran Declarations EO Options Comments

☒ Active

^ Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Definition
TEMP	Block-Var Block=COOLER Variable=HOT-TEMP Sentence=STREAM-PROP Units=C
TOBJ	Block-Var Block=COOLER Variable=T-HOT Sentence=PARAM Units=C
*	

New Delete Copy Paste Move Up Move Down View Variables

^ Edit selected variable

Variable **TOBJ**

Category

☐ All

☒ Blocks

☐ Streams

☐ Model Utility

☐ Property Parameters

☐ Reactions

Reference

Type **Block-Var**

Block: **COOLER**

Variable: **T-HOT**

Sentence: **PARAM**

Units: **C**

EO input

Open variable

Description

Figura 67. Pestaña Define construcción Design Specs del intercambiador de refrigeración.

Define Spec Vary Fortran Declarations EO Options Comments

Design specification expressions

Spec	TEMP
Target	TOBJ
Tolerance	0,01

Figura 68. Pestaña Spec construcción Design Specs del intercambiador de refrigeración.

☒ Define
 ☒ Spec
 ☒ **Vary**
☐ Fortran
 ☐ Declarations
 ☐ EO Options
 ☐ Comments

Manipulated variable

Type: **Stream-Var**

Stream: **11**

Substream: **MIXED**

Variable: **MASS-FLOW**

Units: **kg/hr**

Manipulated variable limits

Lower: **5000**

Upper: **25000**

Step size:

Maximum step size:

Report labels

Line 1	Line 2	Line 3	Line 4

EO input

Open variable:

Description:

Figura 69. Pestaña Vary construcción Design Specs del intercambiador de refrigeración.

☒ Define
 ☒ Calculate
 ☒ Sequence
 Tears
 Stream Flash
 Comments

☒ Active
☐ Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Information flow	Definition
POTAS	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=POTAS Units=kmol/hr
CALCI	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=CALCI Units=kmol/hr
MOLEIC	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=M-OLEIC Units=kmol/hr
MNHEX	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=M-N-HEX Units=kmol/hr
MLACTO	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=M-LACTO Units=kmol/hr
MGLUTA	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=M-GLUTA Units=kmol/hr
NSUCRO	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=N-SUCRO Units=kmol/hr
NGLUCO	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=N-GLUCO Units=kmol/hr
NFRUCTO	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=N-FRUCTO Units=kmol/hr
NACITR	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=N-A-CITR Units=kmol/hr
NAASC	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=N-A-ASC Units=kmol/hr
WATER	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=WATER Units=kmol/hr
TOBJ	Export variable	Block-Var Block=UHT Variable=T-COLD Sentence=PARAM Units=C
PINREG1	Import variable	Stream-Var Stream=1 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
POREG1	Import variable	Stream-Var Stream=2 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
TOREG1	Import variable	Stream-Var Stream=2 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
FLUVAP	Import variable	Stream-Var Stream=10 Substream=MIXED Variable=MASS-FLOW Units=kg/hr
PVAP	Import variable	Stream-Var Stream=10 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
TVAP	Import variable	Stream-Var Stream=10 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
TOREG2	Import variable	Stream-Var Stream=5 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C

New Delete Copy Paste Move Up Move Down View Variables

☐ Edit selected variable

Variable: POTAS
Category:

- ☒ All
- ☐ Blocks
- ☐ Streams
- ☐ Model Utility
- ☐ Property Parameters
- ☐ Reactions

Reference:

- Type: Mole-Flow
- Stream: 1
- Substream: MIXED
- Component: POTAS
- Units: kmol/hr

Information flow:

- ☐ Import variable
- ☒ Export variable
- ☐ Tear variable

Figura 70. Variables importadas y exportadas calculator principal (1)

Define
Calculate
Sequence
Tears
Stream Flash
Comments

☒ Active

Sampled variables (drag and drop variables from form to the grid below)

Variable	Information flow	Definition
WATER	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=WATER Units=kmol/hr
TOBJ	Export variable	Block-Var Block=UHT Variable=T-COLD Sentence=PARAM Units=C
PINREG1	Import variable	Stream-Var Stream=1 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
POREG1	Import variable	Stream-Var Stream=2 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
TOREG1	Import variable	Stream-Var Stream=2 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
FLUVAP	Import variable	Stream-Var Stream=10 Substream=MIXED Variable=MASS-FLOW Units=kg/hr
PVAP	Import variable	Stream-Var Stream=10 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
TVAP	Import variable	Stream-Var Stream=10 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
TOREG2	Import variable	Stream-Var Stream=5 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
POREG2	Import variable	Stream-Var Stream=5 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
TOCOOL	Import variable	Stream-Var Stream=8 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
POCOOL	Import variable	Stream-Var Stream=8 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
POUHT	Import variable	Stream-Var Stream=3 Substream=MIXED Variable=PRES Units=bar
DINRET	Import variable	Block-Var Block=RET Variable=IN-DIAM Sentence=PARAM Units=mm
TINPROC	Export variable	Stream-Var Stream=1 Substream=MIXED Variable=TEMP Units=C
TOUTPROC	Export variable	Block-Var Block=COOLER Variable=T-HOT Sentence=PARAM Units=C
FLUX	Import variable	Stream-Var Stream=2 Substream=MIXED Variable=MASS-FLOW Units=kg/hr
ACIDMALI	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=MALIC-01 Units=kmol/hr
NACL	Export variable	Mole-Flow Stream=1 Substream=MIXED Component=SODIU-01 Units=kmol/hr
*		

Edit selected variable

Variable

POTAS

Category

All

Blocks

Streams

Model Utility

Property Parameters

Reactions

Reference

Type

Stream:

Substream:

Component:

Units:

Mole-Flow

1

MIXED

POTAS

kmol/hr

Information flow

☐ Import variable
☒ Export variable
☐ Tear variable

EO input

Open variable

Description

Figura 71: Variables importadas y exportadas calculator principal (2)

☒ Define
☒ Calculate
☒ Sequence
Tears
Stream Flash
Comments

Calculator block execution sequence

Execute
Block type
Block name

Based on order in sequence

List variables as import or export

Import variables

	PINREG1	TOREG1	POREG1	FLUVAP	PVAP	TVAP	TOREG2	POREG2	T

Export variables

	POTAS	CALCI	MOLEIC	MNHEX	MLACTO	MGLUTA	NSUCRO	NGLUCO	N

Figura 72. Sequence del calculator principal.