



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

POSGRADO

**Diseño y optimización de un sistema
pasteurizador de leche para productores
pequeños, mediante simulación en EES
(Engineering Equation Solver)**

Tesis que como requisito para obtener el grado de:

Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental

Presenta:

Luis Gutiérrez Fragosa

Director de Tesis: Dr. Ignacio R. Martín Domínguez

Chihuahua, Chih. Junio de 2010

Agradecimientos

A Dios, para quien no hay imposibles, por permitir que todo se diera para lograr mi superación.

A mis padres Manuel y Delia, por haberme enseñado principios morales y el valor del esfuerzo.

A mí adorada esposa Olivia y a mis hijas Karen Olivia y Sara Delia agradecido por su apoyo y comprensión.

A todos mis maestros por haber iluminado mi camino, en especial al Dr. Ignacio Martín quien me orientó para mi desarrollo en postgrado.

Resumen

Chihuahua es el 4º productor nacional de leche. La mayor parte de esta producción se consume como leche fresca y otra parte de ésta, se procesa, principalmente como queso.

Existen en el estado plantas productoras de queso bien tecnificadas, con capacidad para pasteurizar y procesar su leche, pero existe también un buen número de pequeños productores, los cuales carecen de pasteurizadores, debido principalmente a su alto costo de adquisición. Esta situación aumenta el riesgo de propagación de enfermedades de origen microbiológico, además de limitarlos en la calidad de sus productos, por no poder controlar la especie de microbios que acidifican su producto.

Este es un estudio que propone la selección, modelado, simulación y optimización de un intercambiador de calor que cumpla con las condiciones de: ser de fácil fabricación, tener bajos costos, tanto de fabricación como de operación y cumplir la función de elevar y sostener la temperatura de un volumen de leche para lograr un pasteurizado lento.

Índice

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
BREVE HISTORIA DE LA INDUSTRIA LÁCTEA	1
<i>Leche</i>	2
<i>Propiedades Físicas</i>	2
<i>Propiedades químicas y composición</i>	2
<i>Propiedades microbiológicas</i>	3
PANORAMA DE LA PRODUCCIÓN LECHERA	4
EL QUESO TIPO CHIHUAHUA Y SU “CONTRIBUCIÓN” AL PROBLEMA	6
LA DUPLA SALUBRIDAD-CALIDAD	6
PASTEURIZACIÓN	7
NORMAS MEXICANAS SOBRE PASTEURIZACIÓN	8
OPCIONES COMERCIALES DE PASTEURIZADORES	8
COSTOS DE EQUIPOS DE PASTEURIZADO	8
PLANTEANDO EL PROBLEMA	9
REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	10
CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN DE LOS PEQUEÑOS PRODUCTORES	10
OBSERVACIONES SOBRE LAS CONDICIONES ACTUALES	11
CONSIDERACIONES PARA EL SISTEMA A PROPONER	12
<i>Fuente de calentamiento</i>	12
<i>Materiales y equipos disponibles</i>	13
CRITERIOS DE SELECCIÓN DE INTERCAMBIADOR	13
<i>Intercambiador seleccionado</i>	16
METODOLOGÍA DEL DISEÑO	16
<i>Esquema del sistema propuesto</i>	17
<i>Acomodo de intercambiadores de calor</i>	18
<i>Factor tiempo</i>	19
<i>Optimización en costos</i>	20
HIPÓTESIS	21
OBJETIVO GENERAL	21
OBJETIVOS PARTICULARES	21
ORGANIZACIÓN SECUENCIAL DE TRABAJO DE TESIS	22
DESARROLLO	23
SOFTWARE	25
CRITERIOS DE SIMPLIFICACIÓN DEL SISTEMA MODELADO	26
DATOS DE ENTRADA	26
MÉTODO DE CÁLCULO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR	27
SENTIDO RELATIVO DE FLUJOS DENTRO DEL INTERCAMBIADOR	27
MODELADO DE INTERCAMBIO TÉRMICO	27
PROPIEDADES DE FLUIDOS	30
AUMENTO DE TEMPERATURA EN EL RECIPIENTE DE LECHE	30

COSTOS DE FABRICACIÓN Y OPERACIÓN.....	31
<i>Costo de fabricación</i>	31
<i>Costo de Operación</i>	32
<i>Calculo de potencia para desplazar los flujos</i>	33
<i>Costo de electricidad</i>	34
<i>Costo Total</i>	34
<i>Costo Unitario</i>	34
<i>Costo Penal</i>	35
<i>Costo Optimizado</i>	36
OPTIMIZACIÓN	37
<i>Operación del sistema de optimización</i>	38
<i>Ajustes de paro del optimizador</i>	45
<i>Simulación de escenarios</i>	46
<i>Optimizando escenarios</i>	48
RESULTADOS	49
VARIABLES REGISTRADAS	50
MÍNIMOS UNITARIOS TOTALES POR NÚMERO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	51
RELACIÓN DE COSTOS CON EL TIEMPO DE CALENTAMIENTO.....	51
RELACIÓN DE COSTOS CON EL NÚMERO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	54
COSTOS TOTALES UNITARIOS MÍNIMOS.....	54
PARÁMETROS DE PRE-DISEÑO	57
PROYECCIÓN A 20 AÑOS.....	58
OTROS RESULTADOS	59
ÁREAS DE INTERCAMBIO TERMICO	59
VELOCIDAD DE FLUJO	62
RELACIÓN DE COSTOS.....	64
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	66
NO CONVERGENCIAS.....	66
ÓPTIMOS POR NUMERO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	67
IMPACTO DEL FACTOR TIEMPO DE CALENTAMIENTO EN COSTOS.....	67
IMPACTO DEL NÚMERO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR EN COSTOS	68
COSTOS FABRICACIÓN Y OPERACIÓN	68
MECÁNICA DEL INTERCAMBIO.....	70
<i>Áreas</i>	70
<i>Velocidades</i>	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73
APÉNDICE	74
MODELADO DE VARIABLES	74
<i>Viscosidad leche</i>	74
<i>Viscosidad agua:</i>	74
<i>Conductividad térmica leche</i>	76
<i>Conductividad térmica agua</i>	76
<i>Nº de Prandtl</i>	77

<i>Cp de leche:</i>	78
<i>Cp del agua:</i>	78
<i>Densidad de leche</i>	79
<i>Densidad del agua</i>	79
<i>Calculo de potencia de bomba</i>	79
CÓDIGO EN EES DE MODELO	82
COSTOS DE TUBERÍA COMERCIAL	88
RESULTADOS COMPLETOS	89
GRAFICAS	97
<i>250 litros:</i>	97
<i>500 litros</i>	98
<i>750 litros</i>	100
<i>1000 litros</i>	101
<i>1250 litros</i>	103
<i>1500 litros</i>	104
<i>1750 litros</i>	106
<i>2000 litros</i>	107
<i>2250 litros</i>	109
<i>2500 litros</i>	110
<i>2750 litros</i>	112
<i>3000 litros</i>	113
<i>Mínimos</i>	115
<i>Por intercambiadores de calor</i>	117
<i>30 minutos</i>	117
<i>60 minutos</i>	118
<i>90 minutos</i>	120
<i>Proyección a 1, 2, 3, 4, 5,10 y 20 años</i>	121

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1: Principales estados productores de leche	4
Ilustración 2 Distribución de leche producida en Chihuahua.....	5
Ilustración 3 Producción artesanal de queso Chihuahua	11
Ilustración 4 Intercambiador tubo en tubo	16
Ilustración 5 Esquema básico de sistema propuesto	17
Ilustración 6 Acomodo de intercambiadores de calor, en paralelo y en serie	18
Ilustración 7 Flujo másico y numero de Reynolds	19
Ilustración 8 Organización secuencial del trabajo de tesis.....	22
Ilustración 9 Esquema general de sistema	24
Ilustración 10 Portada EES.....	25
Ilustración 11 Función costo tubo acero inoxidable.....	32
Ilustración 12 EES optimizando	37
Ilustración 13 Ciclo de cálculo de optimización en costos	39
Ilustración 14 Dimensionamiento de intercambiador.....	42
Ilustración 15 Temperaturas de salida y entrada entre intercambiadores de calor	44
Ilustración 16 Convergencia de resultados	49
Ilustración 17 Mínimos totales por numero de intercambiadores de calor	51
Ilustración 18 Costos totales unitarios para 500 L	52
Ilustración 19 Costos totales unitarios para 1500 L	52
Ilustración 20 Costos totales unitarios para 2500 L	53
Ilustración 21 Efecto de numero de intercambiadores de calor en costo total unitario	54
Ilustración 22 Costos totales unitarios mínimos	56
Ilustración 23 Proyección de costos hasta 20 años	58
Ilustración 24 Proyección costo unitario a 20 años.....	59
Ilustración 25 Área de intercambiador para 500 L.....	60
Ilustración 26 Área de intercambiador para 1500 L.....	60
Ilustración 27 Área de intercambiador para 2500 L.....	61
Ilustración 28 Velocidad de flujo para 500 L	62
Ilustración 29 Velocidad de flujo para 1500 L	63
Ilustración 30 Velocidad de flujo para 2500 L	63
Ilustración 31 Relación porcentual costos de fabricación y operación	65
Ilustración 32 Diferencia de temperaturas en intercambiador de calor	66
Ilustración 33 Calentamiento mismo volumen y número de intercambiadores de calor a 30, 60 y 90 min. ..	68
Ilustración 34 Áreas de transferencia.....	70
Ilustración 35 Velocidad de flujos.....	71
Ilustración 36 Función viscosidad	75
Ilustración 37 Función conductividad.....	76
Ilustración 38 N° de Prandtl	77
Ilustración 39 Función Cp del agua.....	78
Ilustración 40 Función densidad del agua	79
Ilustración 41 Volumen de control para calculo de potencia de bomba	80

Ilustración 42 Costos para 250L. , 30, 60 y 90 min.	97
Ilustración 43 Área hx para 250L. , 30, 60 y 90 min.....	97
Ilustración 44 Velocidad de leche para 250L. , 30, 60 y 90 min	98
Ilustración 45 Costos para 500L. , 30, 60 y 90 min.	98
Ilustración 46 Área hx para 500L. , 30, 60 y 90 min.....	99
Ilustración 47 Velocidad de leche para 500L. , 30, 60 y 90 min	99
Ilustración 48 Costos para 750L. , 30, 60 y 90 min.	100
Ilustración 49 Área hx para 750L. , 30, 60 y 90 min.....	100
Ilustración 50 Velocidad de leche para 750L. , 30, 60 y 90 min	101
Ilustración 51 Costos para 1000L. , 30, 60 y 90 min.	101
Ilustración 52 Área hx para 1000L. , 30, 60 y 90 min.....	102
Ilustración 53 Velocidad de leche para 1000L. , 30, 60 y 90 min	102
Ilustración 54 Costos para 1250L. , 30, 60 y 90 min.	103
Ilustración 55 Área hx para 1250L. , 30, 60 y 90 min.....	103
Ilustración 56 Velocidad de leche para 1250L. , 30, 60 y 90 min	104
Ilustración 57 Costos para 1500L. , 30, 60 y 90 min.	104
Ilustración 58 Área hx para 1500L. , 30, 60 y 90 min.....	105
Ilustración 59 Velocidad de leche para 1500L. , 30, 60 y 90 min	105
Ilustración 60 Costos para 1750L. , 30, 60 y 90 min.	106
Ilustración 61 Área hx para 1750L. , 30, 60 y 90 min.....	106
Ilustración 62 Velocidad de leche para 1750L. , 30, 60 y 90 min	107
Ilustración 63 Costos para 2000L. , 30, 60 y 90 min.	107
Ilustración 64 Área hx para 2000L. , 30, 60 y 90 min.....	108
Ilustración 65 Velocidad de leche para 2000L. , 30, 60 y 90 min	108
Ilustración 66 Costos para 2250L. , 30, 60 y 90 min.	109
Ilustración 67 Área hx para 2250L. , 30, 60 y 90 min.....	109
Ilustración 68 Velocidad de leche para 2250L. , 30, 60 y 90 min	110
Ilustración 69 Costos para 2500L. , 30, 60 y 90 min.	110
Ilustración 70 Área hx para 2500L. , 30, 60 y 90 min.....	111
Ilustración 71 Velocidad de leche para 2500L. , 30, 60 y 90 min	111
Ilustración 72 Costos para 2750L. , 30, 60 y 90 min.	112
Ilustración 73 Área hx para 2750L. , 30, 60 y 90 min.....	112
Ilustración 74 Velocidad de leche para 2750L. , 30, 60 y 90 min	113
Ilustración 75 Costos para 3000L. , 30, 60 y 90 min.	113
Ilustración 76 Área hx para 3000L. , 30, 60 y 90 min.....	114
Ilustración 77 Velocidad de leche para 3000L. , 30, 60 y 90 min	114
Ilustración 78 Costos unitarios mínimos	115
Ilustración 79 Áreas de transferencia de mínimos.....	115
Ilustración 80 Velocidades de flujo de mínimos.....	116
Ilustración 81 Costos mínimos por nº de intercambiadores de calor 30 min.	117
Ilustración 82 Áreas de mínimos por nº de intercambiadores de calor 30 min.....	117
Ilustración 83 Velocidad de flujo de mínimos por nº de intercambiadores de calor 30 min.....	118
Ilustración 84 Costos mínimos por nº de intercambiadores de calor 60 min.	118
Ilustración 85 Áreas de mínimos por nº de intercambiadores de calor 60 min.....	119

Ilustración 86 Velocidad de flujo de mínimos por nº de intercambiadores de calor 60 min.....	119
Ilustración 87 Costos mínimos por nº de intercambiadores de calor 90 min.	120
Ilustración 88 Áreas de mínimos por nº de intercambiadores de calor 90 min.....	120
Ilustración 89 Velocidad de flujo de mínimos por nº de intercambiadores de calor 30 min.....	121
Ilustración 90 Costos a 20 años	121
Ilustración 91 Costo unitario a 20 años	122
Ilustración 92 Área a 20 años	122

Lista de Tablas

Tabla 1 Composición media de leche	3
Tabla 2 Bacterias que se reproducen en leche.....	3
Tabla 3 Tipos de pasteurización	7
Tabla 4 Costo pasteurizadores de patente.....	8
Tabla 5 Ventajas y desventajas de métodos de pasteurización	9
Tabla 6 Conveniencia por tipo de intercambiador	15
Tabla 7 Propiedades de fluidos.....	30
Tabla 8 Volúmenes por lote a calentar.....	46
Tabla 9 Tiempos de calentamiento	47
Tabla 10 Numero de Intercambiadores de calor.....	47
Tabla 11 Condiciones en que no se obtuvieron resultados.....	50
Tabla 12 Costos totales unitarios mínimos.....	55
Tabla 13 Parámetros de pre-diseño de intercambiador	57
Tabla 14 costo de fabricación y operación para 2000 L.	64
Tabla 15 Costo unitario de tuberías comerciales	88
Tabla 16 Resultados completos.....	89

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Transferencia de calor en el intercambiador	27
Ecuación 2. Razón de capacidad calorífica	27
Ecuación 3 Efectividad por relación calórica	28
Ecuación 4 Efectividad.....	28
Ecuación 5 NTU.....	28
Ecuación 6 Coeficiente total de transferencia de calor.....	28
Ecuación 7 Coeficiente de transferencia de calor convectivo.....	29
Ecuación 8 Nusselt Ecuación de Colburn.....	29
Ecuación 9 Numero de Reynolds.....	29
Ecuación 10 Numero de Prandtl.....	29
Ecuación 11 Derivada de variación de temperatura en el depósito de leche con respecto al tiempo.....	30
Ecuación 12 Variación de temperatura en el depósito de leche con respecto al tiempo.....	31
Ecuación 14 Perdidas por fricción flujo frio.....	33
Ecuación 13 Calculo factor de fricción.....	33
Ecuación 16 Potencia para desplazar los flujos.....	33
Ecuación 17 Potencia mecánica total.....	34
Ecuación 18 Eficiencia de bombas.....	34
Ecuación 18 Función costo operación.....	34
Ecuación 19 Costo total.....	34
Ecuación 20 Costo unitario de fabricación.....	35
Ecuación 21 Costo unitario de operación.....	35
Ecuación 22 Costo total unitario.....	35
Ecuación 23 Costo penalización.....	36
Ecuación 24 Costo optimizado.....	36
Ecuación 26 Función viscosidad leche.....	74
Ecuación 27 Función viscosidad agua.....	74
Ecuación 28 Función conductividad leche.....	76
Ecuación 29Función conductividad agua.....	76
Ecuación 29Nº Prandtl leche.....	77
Ecuación 30 Nº Prandtl agua.....	77
Ecuación 31 Función Cp del agua.....	78
Ecuación 32 Función densidad del agua.....	79
Ecuación 33 Ecuación de la energía.....	80
Ecuación 34 Ecuación de la bomba.....	80
Ecuación 35 Función costo tubo.....	88

Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Descripción	Dimensión(es)
A	área	m ²
c	relación de capacidades caloríficas	-
C	índice de capacidad calorífica	W / °C
CO	costo	\$
Cp	calor específico a presión constante	kJ / kg K
CP	costo de penalización	\$
CT	costo de tubo	\$
D	diámetro	m
FF	Factor de fricción	
g	aceleración gravitacional	m / s ²
h	coeficiente de transferencia de calor por convección	W / m ² °C
k	conductividad térmica	W / m °C
L	longitud	m
m	masa	kg
max	máximo	
mini	mínimo	
min	minutos	
\dot{m}	flujo másico	kg/s
NTU	número de unidades de transferencia	-
Nu	número de Nusselt	-

Per	perdidas por fricción	
Pot	potencia	W
Pr	número de Prandtl	-
\dot{q}	flujo de calor	W / m ²
Q	transferencia total de calor	kJ
\dot{Q}	índice de transferencia de calor	kW
Re	número de Reynolds	-
t	tiempo	s
T	temperatura	°C
TE	tarifa eléctrica	\$/ kW h
U	coeficiente total de transferencia de calor	W / m ² °C
\dot{V}	flujo volumétrico	m ³ / s
V	velocidad	m / s

Letras Griegas

Letra	Descripción	Dimensión(es)
ε	efectividad del intercambiador	-
η	eficiencia	-
μ	viscosidad dinámica	kg / m s
ρ	densidad	kg / m ³
γ	peso específico	N/m ³

Subíndices

Subíndice	Descripción
e	Eléctrica(o)
en	entrada
ext	exterior
fab	fabricación
hid	hidráulico
i	i-ésimo componente
ini	inicial
hx	intercambiador
M	leche
max	máximo
min	mínimo
op	operación
paster	pasteurización
sal	salida
scc	seccional
tc	transferencia de calor
tot	total
W	Agua

Introducción

Breve historia de la industria láctea

El consumo humano de la leche de origen animal, comenzó hace unos 11,000 años, con la domesticación del ganado. Este proceso se dio principalmente en oriente medio.

Durante la edad antigua y la edad media, la leche era muy difícil de conservar y por esta razón las opciones de consumo eran: fresca, fermentada o en forma de quesos. Con el tiempo se fueron añadiendo otros productos lácteos como la mantequilla.

En el México prehispánico, los indígenas carecían de animales productores de leche. Al principio de la conquista, la multiplicación del ganado fue muy lenta. A principios del siglo XVI se introducen reses de Santo Domingo y la Habana. Los animales anteriormente introducidos eran cruzados. El ganado para la fundación de la lechería en México provino de Andalucía. Durante los primeros años del México independiente, la ganadería bovina permanece igual que en la época colonial.

En el siglo XIX, la ganadería se desarrolla principalmente en las haciendas, la leche como producto era consumida en forma regional.

La revolución industrial en Europa, alrededor de 1830, trajo la posibilidad de transportar la leche fresca, desde las zonas rurales a las grandes ciudades, gracias a las mejoras en los transportes. Con el tiempo fueron apareciendo nuevos instrumentos en la industria de procesamiento de leche.

A principios del siglo XX, en el Distrito Federal se establece la primera factoría industrializadora de leche para producir crema y mantequilla. En la etapa Porfirista aumenta el consumo y las importaciones. Después de una disminución del 50% del hato ganadero en la época revolucionaria, Venustiano Carranza, por la necesidad de repoblar, se importó ganado Holstein, Jersey y Pardo Suizo. En esta época se establecen pequeños expendios de leche fluida.

En 1922, en nuestra región chihuahuense, por autorización del Presidente Alvaro Obregón, se instalan en lo que hoy es Cd. Cuauhtémoc, la comunidad Menonita, formada originalmente por 5000 personas. Esta comunidad de origen Holandés-Alemán tiene una fuerte vocación para la crianza de ganado lechero.

En la década de los 30's se formula la legislación para proceso y comercialización de lácteos. A partir de los años 50's y hasta la fecha, la producción de leche se especializa, se tecnifica y los productores se integran de manera vertical y horizontal.

Leche

Por definición, la leche materna cumple la función de nutrir a los hijos hasta que son capaces de digerir otros alimentos, sin embargo los humanos de la gran mayoría de las civilizaciones (a excepción de algunas de oriente), hemos adoptado a la leche de mamíferos domesticados como parte de nuestra dieta, principalmente de vaca, pero también de oveja, cabra, yegua, camella y otros.

Propiedades Físicas

Es una mezcla compleja y heterogénea compuesta por un sistema coloidal de tres fases:

Solución: los minerales así como los hidratos de carbono se encuentran disueltos en el agua.

Suspensión: las sustancias proteicas se encuentran con el agua en suspensión.

Emulsión: la grasa butírica de la leche es una emulsión en agua. (Badui, 1981)

Propiedades químicas y composición

El pH de la leche es ligeramente ácido (pH entre 6,6 y 6,8). Otra propiedad química importante es la acidez, o cantidad de ácido láctico, que suele ser de 0,15-0,16% de la leche (Badui, 1981).

La Tabla 1 muestra la composición media de la leche de vaca

Tabla 1 Composición media de leche		
Componente	Composición media (g / L)	%
Agua	900	87.4
Extracto seco	130	12.6
Materia grasa	35-40	3.4-3.9
Proteínas	30-35	2.9-3.4
Carbohidratos	45-50	4.36-4.85
Minerales	8-10	0.77-0.97

Propiedades microbiológicas

La leche recién obtenida, por definición es estéril, pero es un sustrato ideal para el desarrollo de un gran número de géneros bacterianos, algunos beneficiosos y otros perjudiciales, que provocan alteraciones diversas del alimento y sus propiedades.

La tabla 2 muestra las familias de bacterias que se desarrollan en la leche de acuerdo al efecto que producen en ella (Badui, 1981).

Tabla 2 Bacterias que se reproducen en leche	
Tipo de Bacterias	Efectos en la leche
Lácticas	Fermentadoras de carbohidratos.
Propiónicas	Degradan la leche para formar ácido.
Butíricas	Degradan grasa
Patógenas	Descomposición y enfermedades como: tuberculosis, difteria, polio, salmonelosis, fiebre escarlata y tifoidea.

La leche es un alimento con muy alto contenido de humedad y por lo mismo es muy susceptible a una proliferación microbiana, por lo que es importante observar buenas técnicas de manejo desde la obtención (ordeña), su conservación previa, su manejo, hasta su proceso.

Panorama de la producción lechera

El Estado de Chihuahua, tradicionalmente ganadero, ha vendido acrecentando su hato lechero. Su volumen de producción a crecido al grado que desde hace algunos años ocupa el 4° lugar a nivel nacional, por debajo de Jalisco, Coahuila y Durango (SAGARPA, boletín de leche, 2008).

En la ilustración 1 se muestra el volumen de producción de los cuatro principales estados productores de leche del país.

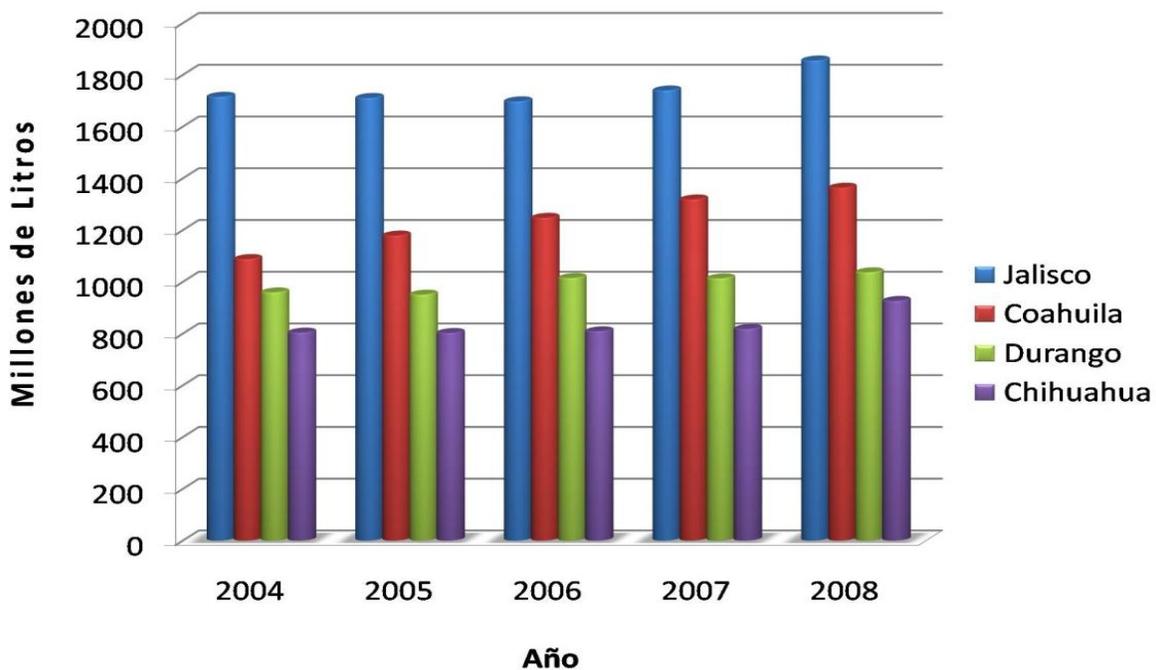


Ilustración 1: Principales estados productores de leche

De la producción de Chihuahua, el 73% se industrializa y vende como leche fresca pasteurizada, el 23% se procesa en 40 plantas grandes, productoras de queso y otros derivados lácteos, que están bien tecnificadas, este 96% de la producción estatal, se

puede considerar inocuo para el consumo. Sin embargo, el restante 4% de la producción, es leche cuyos productores no pueden venderla por está alejados de los centros de acopio, o que no quieren venderla, ya que por su poco volumen tratan de obtener mayor utilidad, dándole valor agregado y deciden procesarla por sus propios medios. En esta situación se encuentra un grupo de 75 micro empresas (Secretaria de Desarrollo Industrial, 2008).

La ilustración 2 muestra la distribución de la producción de leche en Chihuahua, es de señalarse que el 4% del volumen producido, es procesado por 75 micro empresas que producen principalmente queso.

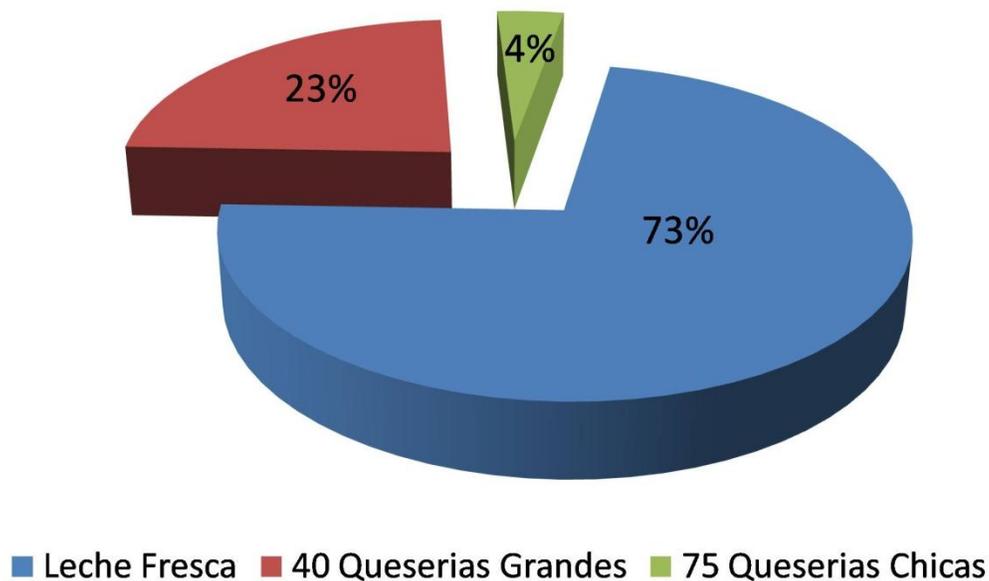


Ilustración 2 Distribución de leche producida en Chihuahua

Por costumbre, los pequeños productores no aplican a su materia prima, ningún tratamiento para control del contenido microbiano, para la elaboración de queso. Por esta razón, se obtienen quesos de calidad variable y no se tiene control sobre el riesgo de microbios patógenos.

Es importante señalar que aun y cuando el volumen de leche procesado es relativamente pequeño, la probabilidad de generar y distribuir productos con carga

patógena, es potencialmente alta y que esto puede derivar en un serio problema de salud pública.

El queso tipo Chihuahua y su “contribución” al problema

Este tipo de queso comenzó a fabricarse a raíz del establecimiento de la comunidad menonita. Ésta comunidad, comenzó con la producción de leche y fabricación quesos y otros derivados. Para ello hizo una adaptación de la receta original del queso tipo Cheddar, a las nuevas condiciones de vida y obtuvo un producto fresco de rápido desplazamiento, ya que a diferencia del queso cheddar original, el queso tipo chihuahua no lleva un tiempo de maduración, solo una fermentación rápida en el depósito de leche, donde se realiza el cuajado de la misma, que se llama “cheddarización”, para lograr que el queso acidifique un poco y produzca “hebras” al calentarlo.

Cuando un queso se va a fermentar, es necesario eliminar la mayor parte de la carga microbiana que pueda traer la leche, e inocularle una cepa microbiana iniciadora (llamada “estárter”, en la industria), la cual durante el periodo de cheddarización, se desarrolla para modificar las propiedades del queso y darles sus características organolépticas especiales como: color, olor, sabor y textura.

Debido al corto tiempo entre la ordeña y el procesamiento y considerando que el queso se va a vender en estado fresco, pareciera que no es necesario el iniciador. Por esta razón y las difíciles condiciones económicas que enfrentaron en sus inicios, optaron por procesar la leche sin atender sus aspectos microbiológicos.

De ahí se volvió costumbre el no acondicionar la materia prima y utilizar como acidificadores, a los microbios fermentadores que normalmente están suspendidos en el aire, para obtener sus productos. Esta costumbre implica la proliferación de microbios al azar y con ello un alto riesgo de reproducir microbios patógenos.

La dupla salubridad-calidad

Si se compara un proceso de fabricación de queso en el cual no se disminuye su carga microbiana inicial en leche, y no se inocular con una cepa apropiada, contra un queso en el cual se disminuye la carga microbiana original y además se inocular con una cepa

apropiada, es de esperarse que, en el primer caso, el riesgo de presencia de patógenos sea alto y la posibilidad de obtener un queso de buena calidad disminuya. En cambio, en el segundo caso el riesgo de presencia de patógenos es nulo y la buena calidad del producto está asegurada. De ahí se establece la importancia básica de disminuir la carga microbiana de la leche, mejor conocida como pasteurización.

Pasteurización

La pasteurización es un proceso térmico, aplicado a la leche (entre otros alimentos líquidos) a una combinación de temperatura y tiempo determinados para reducir los agentes patógenos que puede contener, para posteriormente bajar su temperatura con rapidez. Se diferencia de la ebullición la leche porque, si bien con este tratamiento se obtiene la esterilización, también se obtiene un sabor alterado. (Badui, 1981)

La FDA, administración de drogas y alimentos de EUA, reconoce como procesos de pasteurización estándar varias combinaciones de tiempos y temperaturas. La tabla 3 muestra las combinaciones que se utilizan con mayor frecuencia para el pasteurizado de leche.

Los métodos de pasteurización más comúnmente utilizados son:

- LTLT : Low temperature, long time (Temperatura baja, tiempo largo)
- HTST: High temperature, short time (Alta temperatura, tiempo corto)

Tabla 3 Tipos de pasteurización		
Nombre del Proceso	Temperatura	Tiempo
LTLT	63 °C	30 min
HTST	72 °C	15.00 s
Temperaturas más altas tiempos más cortos	89 °C	1.00 s
	90 °C	0.50 s
	94 °C	0.10 s
	100 °C	0.01 s

Sec. 1240.61 Mandatory pasteurization for all milk and milk products in final package form intended for direct human consumption. (FDA)

Normas mexicanas sobre pasteurización

Los mismos tiempos y temperaturas propuestos por la FDA, son homologados por la Norma Oficial Mexicana para aplicación en nuestro país: NOM-184-SSA1-2002: PRODUCTOS Y SERVICIOS. LECHE, FORMULA LÁCTEA Y PRODUCTO LÁCTEO COMBINADO. ESPECIFICACIONES SANITARIAS.

Opciones comerciales de pasteurizadores

En México existen pocos proveedores de equipos para procesado de lácteos, éstos proveedores, ofrecen las dos opciones:

1. Pasteurización rápida o continua HTST
2. Pasteurización por lotes o lenta. LTLT

Se solicitaron cotizaciones de equipos, los costos de los equipos ofertados resultan ser muy altos para el poder adquisitivo de los pequeños productores.

Costos de equipos de pasteurizado

La tabla 4 muestra los costos de los equipos de pasteurizado en marcas patentadas que vende la empresa Virgilio Guajardo S.A. de C.V., Ámsterdam #46 México D.F. Sitio web <http://vigusa.com.mx/>.

Tabla 4 Costo pasteurizadores de patente		
Nº Equipo	Descripción	Costo más IVA
1	Pasteurizador continuo 1,000 L/h.	US \$27,300.00
2	Pasteurizador lento 500 L / lote	Mx \$69,857.00
3	Pasteurizador lento 1000 L / lote	Mx \$78,500.00

Tanto los equipos de pasteurización continua, como los de pasteurización lenta o por lotes tienen sus ventajas y sus desventajas. En la tabla 5 se muestran estas ventajas y desventajas:

Tabla 5 Ventajas y desventajas de métodos de pasteurización		
Método de Pasteurización	Ventajas	Desventajas
Lenta o por lotes LTLT	<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden procesar volúmenes pequeños. • Más económico de adquirir que la Pasteurización Continua. 	<ul style="list-style-type: none"> • Escalabilidad limitada. • Baja eficiencia energética (Sin regeneración térmica)
Rápida o continua HTST	<ul style="list-style-type: none"> • Maneja altos volúmenes de leche • Alta eficiencia energética (Regeneración, transfiere calor a la leche que entra) 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo se fabrican para altos volúmenes de producción • Cambian el sabor • Son costosos

Planteando el problema

Aun y cuando el volumen de leche a procesar por los pequeños productores de queso representa un porcentaje bajo de la producción estatal, el número de empresas que procesan este volumen de leche es considerable y representan un riesgo potencial de propagación de problemas de salud pública.

Para estos productores, la falta de un equipo de pasteurizado, disminuye al mismo tiempo la calidad de su producto y su confiabilidad.

Los altos costos de los pasteurizadores comerciales hacen poco viable su adquisición.

Al pasteurizar se transfiere calor a la leche hasta que ésta logra una determinada temperatura, con lo que se disminuye considerablemente la carga microbiana, pero es necesario hacerlo sin afectar las sus propiedades organolépticas, no excediendo el

límite de temperatura que lo ocasiona. Por ello es necesario diseñar un sistema de pasteurización que permita alcanzar estos resultados, y que además los costos incurridos sean menores que los derivados de la adquisición de equipos de patente.

Requerimientos de diseño

Para proceder al diseño de un sistema de pasteurización, adecuado para las necesidades de los pequeños productores, se requiere un sistema cuya fuente de calentamiento no sea costoso, que modifique lo menos posible las características organolépticas de la materia prima, el proceso debe realizarse en un tiempo determinado, por medio de un intercambiador que sea fácil de fabricar y con materiales que no reaccionen con los fluidos y que sean fáciles de conseguir, su mantenimiento debe ser sencillo y con mínimos costos de fabricación y operación.

Condiciones actuales de operación de los pequeños productores

La mayor parte de los pequeños productores de queso tienen un espacio acondicionado para la elaboración del producto; generalmente es una pequeña sala de trabajo, semi-ventilada y aislada de insectos voladores, con piso de cemento. Sus equipos de trabajo son los mínimos necesarios, tratando de conservar la simplicidad y facilidad de limpieza.

Cuentan por lo general con un depósito de leche, tipo tina, como recipiente de trabajo, de acero inoxidable, de pared sencilla, que contiene toda la producción del día. Generalmente no cuentan con equipo para dar tratamiento térmico a la leche, o en casos excepcionales se tiene un quemador de gas para calentamiento directo a través de la pared del fondo del depósito.

Cuentan con un juego de moldes para queso y una prensa para forzar la salida del suero de los moldes.

El proceso es bastante simple, comienzan vertiendo la leche a procesar dentro del depósito de trabajo. Suelen agregar suero ácido, de la producción del día anterior, para acidificar la leche rápidamente, antes del proceso de cuajado. El suero así agregado, usualmente tiene una alta concentración microbiana, la cual comienza a fermentar la leche inmediatamente. Se agrega a la leche la enzima renina, llamada comúnmente “cuajo”, para lo cual se requiere que la temperatura del producto esté a 35°C. La

ilustración 3 muestra el esquema de la producción artesanal de queso que comúnmente es utilizada en el estado de Chihuahua.

1 Llenado de tina	• Se vacía de una vez toda la leche a procesar.
2 Ajustar acidez	• Se añade suero del día anterior para acidificar.
3 Ajustar temperatura	• Ajustar T a 35°C, con quemador de gas directo al fondo de la tina
4 Agregar cuajo	• Se utiliza cuajo animal o vegetal
5 Esperar a que cuaje	• El tiempo varía de acuerdo a la cantidad y potencia del cuajo así como la temperatura.
6 Cortado de cuajada	• Cortar la cuajada en pequeños cubos para facilitar la expulsión del suero.
7 Cheddarizado	• Calentar la cuajada escurrida para terminar de acidificar
8 Salado, moldeado y prensado	• La cuajada se sala, se empaca en moldes y éstos se presan para retirar suero.

Ilustración 3 Producción artesanal de queso Chihuahua

Observaciones sobre las condiciones actuales

Los pequeños productores de queso, frecuentemente no necesitan calentar la leche para su procesado como queso, ya que viene directa de la ordeña (con la temperatura de la productora) o bien el recipiente ha recibido algo de energía solar. Sin embargo, cuando es necesario calentarla para procesado o pasteurización, solo cuentan con quemadores de gas para aplicación directa al fondo del depósito de trabajo.

Este método de calentamiento, altera el sabor de la leche debido a que la temperatura de la flama, aplicada por el exterior de éste depósito, es demasiado alta (del orden de los 1000°C) y se aplica en un área reducida (donde la flama del quemador tiene contacto con la lamina del depósito).

En la superficie interior del depósito, en la zona que está en contacto con la flama, debido a la alta conductividad térmica del metal, alcanza temperaturas similares a la de

la flama, la capa de leche en contacto con esta superficie alcanza temperaturas muy altas y aun y cuando se agite constantemente, al haber una capa de leche siempre en contacto con la superficie metálica a alta temperatura, obligatoriamente se produce un cambio en sus propiedades organolépticas.

Por lo tanto, para evitar dañar el producto, se requiere que la transferencia de calor ocurra con un diferencial de temperaturas pequeño, de tal forma que la leche que esté en contacto con la superficie de calentamiento no sufra cambios. Se puede observar que los grandes pasteurizadores de leche utilizan intercambiadores de calor operados con vapor, y que el producto así obtenido es aceptable. A este respecto se debe señalar que tales equipos son muy sofisticados, que se necesita contar con una caldera generadora de vapor, y que por ello se trata de equipos costosos en su adquisición y operación, si bien proveen de un control del proceso muy exacto. Además, la leche si adquiere un sabor distinto al procesarse utilizando vapor, tal vez no desagradable, pero si distinto del sabor original. En éste trabajo se trata de proponer una alternativa tecnológica que mantenga la inocuidad en el producto y que afecte lo menos posible las propiedades organolépticas de la leche.

Los primeros cambios de las propiedades de la leche comienza a partir de los 68°C (Badui, 1981), y la opinión general los micro procesadores de queso es que cualquier calentamiento de la leche le cambia el sabor original. Este aspecto es tomado en consideración al proponer el diseño del pasteurizador en éste trabajo.

La literatura sobre pasteurización de leche solo indica el tiempo y la temperatura ue debe alcanzar la leche al momento de ser pasteurizada, pero no especifica la temperatura a la que será expuesta al momento de su intercambio térmico.

Consideraciones para el sistema a proponer

Fuente de calentamiento.

Se necesita de un intercambiador que opere con un fluido de calentamiento con una temperatura que no sea demasiado alta y tomando en cuenta que para la pasteurización lenta se requieren 63 °C y que los primeros cambios se comienzan a dar a partir de los 68 °C, se propuso que la temperatura del fluido de calentamiento fuera de 65 °C, de ese modo se aseguró de que no habrá cambios en propiedades organolépticas. No existió inconveniente en utilizar agua y además, se observa la

facilidad de que los calentadores de agua para uso domestico no tienen problema en alcanzar esta temperatura.

Materiales y equipos disponibles

Los materiales disponibles eran: tubería común de plomería, fabricada en cobre y acero para el manejo del flujo de agua. También se pudo disponer de tubería, conexiones y lámina, fabricados en acero inoxidable para evitar reacciones al contacto con la leche. Para el desplazamiento de flujos se pudieron conseguir información sobre gran variedad de bombas de distintos tipos, capacidades y materiales de carcasa e impelente.

Criterios de selección de intercambiador

Los intercambiadores de calor comúnmente utilizados para transferir calor entre dos líquidos son de 3 tipos: Carcasa y tubo, tubo en tubo y de placas o platos. Las principales características que se deben de observar para la selección de un intercambiador son: (Shah, 2003)

- Presiones y temperaturas de operación
- Costos de materiales y fabricación
- Incrustación y limpieza
- Fugas de fluido y contaminación

Presiones y temperaturas de operación

Un intercambiador en operación debe soportar el esfuerzo producido por las diferencias de presión y temperatura entre los dos fluidos, estos esfuerzos dependen de las presiones y temperaturas de entrada de los fluidos. Los intercambiadores de calor más versátiles para un amplio rango de presiones y temperaturas de operación son los de *carcasa y tubo* para servicios medio y pesado y *tubo en tubo* para servicios menores de calentamiento.

Para aplicaciones liquido-liquido o liquido-cambio de fase, si las presiones de operación son bajas (menos de 2.5 MPa y 200 °C), se deben considerar intercambiadores de calor de placas, empacados o semi-soldados. (Shah 2003)

Los intercambiadores de calor más recomendables de acuerdo a este criterio son:

- Tubo en tubo
- Placas, empacados o semi-soldados

Costos de materiales y fabricación

El costo es un factor muy importante en la selección del tipo de intercambiador a construir. El costo por unidad de área de transferencia es mayor para los intercambiadores de calor de *placas* que para los intercambiadores de calor de *carcasa y tubo* o *tubo en tubo*. (Shah, 2003)

El intercambiador más recomendable de acuerdo a este criterio es el tipo tubo en tubo.

Incrustación y limpieza

La incrustación y limpieza esta dentro de las consideraciones más importantes para los intercambiadores de calor liquido-liquido y liquido-cambio de fase. En procesos con una incrustación de moderada a media, se utiliza una limpieza periódica dependiendo de la propensión a la incrustación de los intercambiadores de calor. En ambos casos se utilizan intercambiadores de calor de *tubo en tubo*, *carcasa y tubo* o de *placas* indistintamente. (Shah, 2003)

Los intercambiadores de calor más recomendables de acuerdo a este criterio son:

- Tubo en tubo
- Carcasa en tubo
- Platos

Fuga de fluido y contaminación

Para evitar cualquier contaminación por fuga de fluido, se deben utilizar intercambiadores de calor del tipo tubular y de placas, pero los intercambiadores de calor de *placas* empacados tienen una mayor probabilidad de fugas. (Shah, 2003)

Los intercambiadores de calor más recomendables de acuerdo a este criterio son tubo en tubo

Compatibilidad de los fluidos y el material

La selección de materiales y la compatibilidad entre los materiales de construcción y los fluidos son importantes, especialmente con respecto a la corrosión. Los materiales para construir un intercambiador de tubos incluyen una gran variedad de materiales, como

cobre, acero al carbón y acero inoxidable. Los intercambiadores de calor que se utilizaran en alimentos deben tener resistencia a la corrosión. (Shah, 2003)

De acuerdo con este criterio de selección, por ser alimento, debe utilizarse acero inoxidable, en los tipos:

- Tubo en tubo
- Carcasa en tubo
- Placas

La tabla 6 muestra el resumen de las recomendaciones de acuerdo a cada criterio de selección para cada tipo de intercambiador y que sirve de base para seleccionar el tipo más apropiado.

Tabla 6 Conveniencia por tipo de intercambiador			
Característica	Tubo en tubo	Carcasa y tubo	Placas
Presión de Operación	•		•
Costo de Fabricación	•		
Incrustación y limpieza	•	•	•
Fuga de fluido y contaminación	•		
Material de construcción (Acero Inoxidable)	•	•	•
Total	5	2	3

Intercambiador seleccionado

De acuerdo con los criterios de selección revisados, se optó por un intercambiador de tipo tubo en tubo, fabricado en acero inoxidable. Este intercambiador es fácil de fabricar, los materiales son baratos y relativamente fáciles de conseguir.

La ilustración 4 muestra el intercambiador del tipo tubo en tubo, el material de fabricación es acero inoxidable, se muestra en corte para efectos ilustrativos.

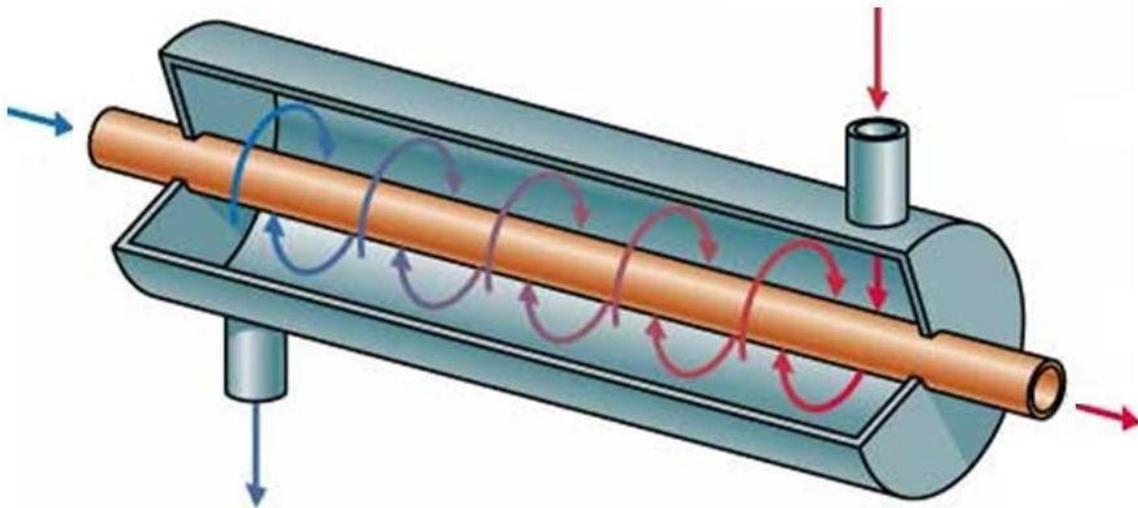


Ilustración 4 Intercambiador tubo en tubo

Metodología del diseño

Tratar de diseñar el sistema a prueba y error no es recomendable. Se podrían fabricar prototipos de pasteurizador con diversas combinaciones de diámetros y distintos largos, pero esto resultaría lento, caro e ineficiente, tampoco se tendría certeza sobre la conveniencia de utilizar un intercambiador o una serie de intercambiadores de calor.

El modelado matemático, permite diseñar el sistema, analizando los efectos, en el proceso y en el costo, de variar los parámetros físicos de diseño. Además de eliminar los costos de fabricación de prototipos, el modelado matemático del sistema permite mediante el cálculo de máximos y mínimos, obtener los valores óptimos de las variables que intervienen en el mismo.

Aun y cuando los valores optimizados no sean reproducibles en la realidad, por ejemplo el diámetro de los tubos, estos valores de referencia pueden utilizarse como guía de pre-diseño para seleccionar la talla más próxima.

Esquema del sistema propuesto

Planteamos el estudio de un sistema que consiste en:

Un recipiente que contiene leche, del cual por medio de una bomba, va a recircular un flujo constante por el tubo interior de uno o varios intercambiadores de calor, donde recibirá energía térmica para aumentar su temperatura y luego retornar al recipiente original. Recirculando continuamente, hasta que se alcance la temperatura de pasteurización lenta en el producto contenido en el depósito.

La ilustración 5 muestra el esquema básico del sistema de calentamiento.

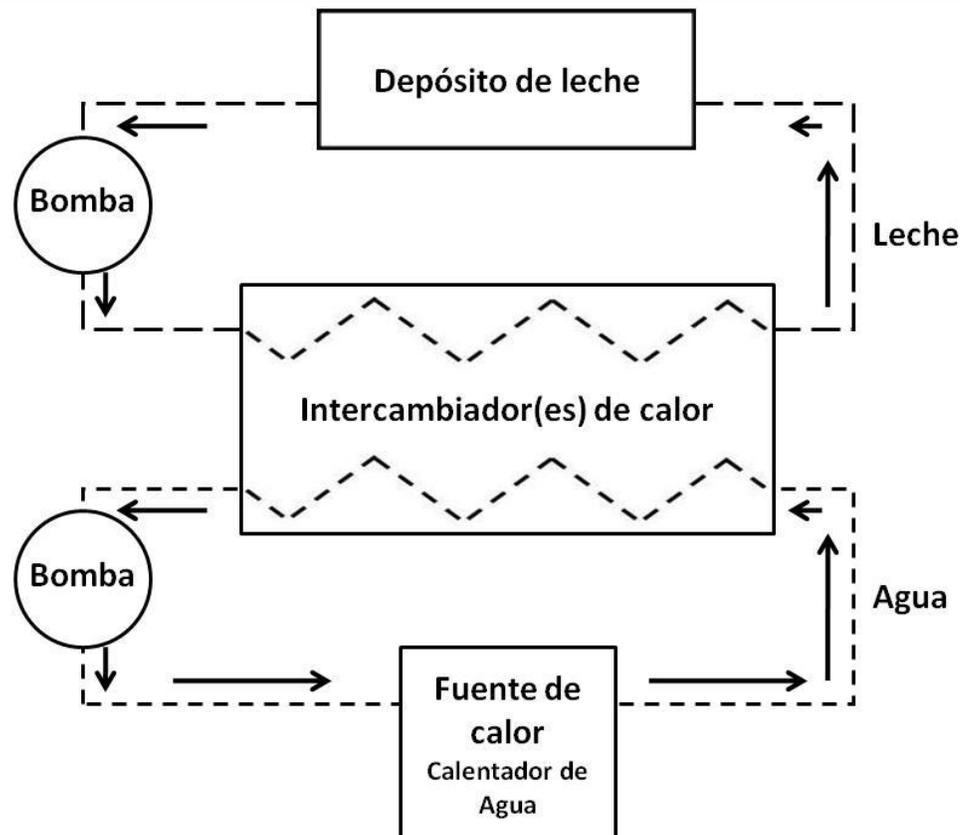


Ilustración 5 Esquema básico de sistema propuesto

Se contará con un calentador de agua que suministrará el agua suficiente a una temperatura constante de 65 °C, el agua será recirculada por medio de una bomba a

través del el espacio anular que queda entre el tubo interior y el tubo exterior del, o los intercambiadores de calor y se continuará la recirculación hasta que, en el depósito la leche alcance la temperatura de pasteurización mencionada.

Buscamos obtener los valores de los parámetros básicos de pre-diseño del intercambiador o intercambiadores de calor que permitan calentar un volumen de leche, en un tiempo definido y al mínimo costo de construcción y operación.

Acomodo de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se pueden acomodar en paralelo, o en serie. La ilustración 6 muestra los dos modos en que es posible acomodar los intercambiadores de calor.

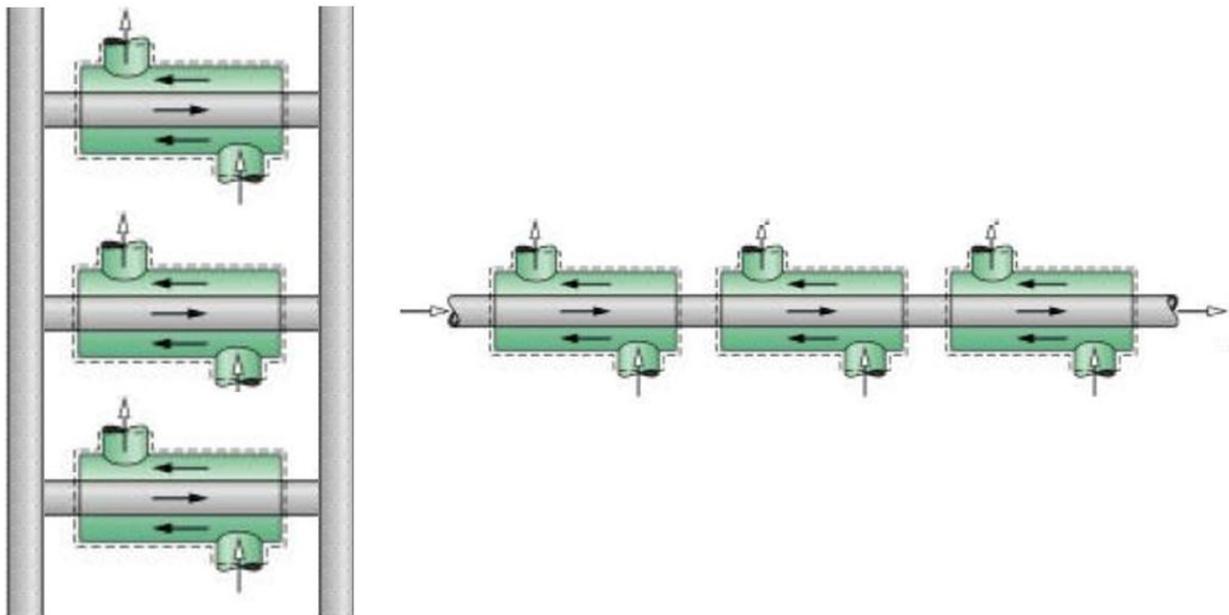


Ilustración 6 Acomodo de intercambiadores de calor, en paralelo y en serie

Si se utiliza el acomodo en paralelo, todos los intercambiadores de calor son alimentados simultáneamente, el flujo másico del fluido a calentar se divide entre el número de intercambiadores de calor, obteniéndose flujos másicos relativamente menores. Como una mayor turbulencia, que se logra a números de Reynolds de valores altos, es uno de los factores que contribuyen a la tasa de transferencia de energía térmica por convección forzada. Es necesario disminuir el diámetro, para

lograr, mediante el angostamiento del área de sección transversal, conseguir valores mayores de velocidad (Ilustración 7).

$$\dot{m} = \rho V A \qquad \text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Ilustración 7 Flujo másico y numero de Reynolds

Por esto, plantear los escenarios con un número progresivo de intercambiadores de calor en paralelo, se determinó que se obtendrían diámetros cada vez menores, en la medida que se aumentarán su número. Como en la realidad no se dispone de tubería con mucha variedad de diámetros, se decidió desechar éste acomodo.

Utilizando el acomodo en línea, se pueden conseguir velocidades apropiadas para buena turbulencia sin necesidad de disminuir los diámetros. Tanto el flujo másico de la leche como el número de Reynolds son básicamente constantes en todos los intercambiadores de calor (salvo los cambios en propiedades de los fluidos causados por la variación de temperatura), porque el flujo de salida del primer intercambiador de calor ingresa en la entrada del segundo intercambiador y así sucesivamente. Este flujo no varía con el número de intercambiadores de calor utilizados porque no se divide. Los valores de diámetros obtenidos, estarán dentro de los valores de la tubería comercial. Por estas razones, se determinó utilizar un arreglo de intercambiadores de calor con acomodo en línea,

Factor tiempo

El proceso de pasteurización, que se aplica al lote de leche, puede durar diferentes tiempos, según las características del equipo utilizado. Un equipo pequeño y más barato, tardará más tiempo en procesar el lote. Un equipo de mayores dimensiones podrá procesar el lote en menos tiempo, pero tendrá mayor costo de adquisición. Como el pequeño productor debe administrar el tiempo de su jornada de trabajo y repartirlo entre todas las operaciones que implica el proceso diario, tiene que asignar al proceso de pasteurización un determinado tiempo.

Por ello se requiere dimensionar el tamaño del equipo de forma tal que pueda procesar el lote en el tiempo disponible en la jornada diaria, pero no necesariamente en menos

tiempo, pues aumentaría el costo. El objetivo es lograr mínimos costos de fabricación, y de operación. Se requiere combinar ambos costos y lograr minimizar el costo total.

Optimización en costos

Aun y cuando pudieran contemplarse diversos indicadores para el diseño del o los intercambiadores de calor, fijamos como indicador principal del diseño optimizado, nuestra función objetivo la suma de los costos de fabricación y costos de operación de un año y para poder comparar entre los distintos volúmenes de producto considerado, se definieron los costos igualados a una unidad de volumen. Se utilizó el costo anual por litro.

Hipótesis

Es posible diseñar y optimizar un sistema pasteurizador de leche, para pequeños volúmenes, en operación por lotes (batch) y que no afecte las propiedades organolépticas del producto, mediante la modelación matemática y simulación numérica.

Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático del sistema de pasteurización de leche, codificarlo en el programa EES (Engineering Equation Solver) para simular el funcionamiento y los costos asociados al diseño y operación del sistema. Encontrar el diseño óptimo y generar conocimiento sobre el efecto de las principales variables en el comportamiento físico y económico del dispositivo propuesto

Objetivos particulares

1. Definir el diseño conceptual del pasteurizador y sus componentes.
2. Modelar el sistema
3. Simular escenarios de distintos volúmenes de producción, número de intercambiadores y tiempos de calentamiento.
4. Optimizar los costos de fabricación y operación.

Organización secuencial de trabajo de tesis

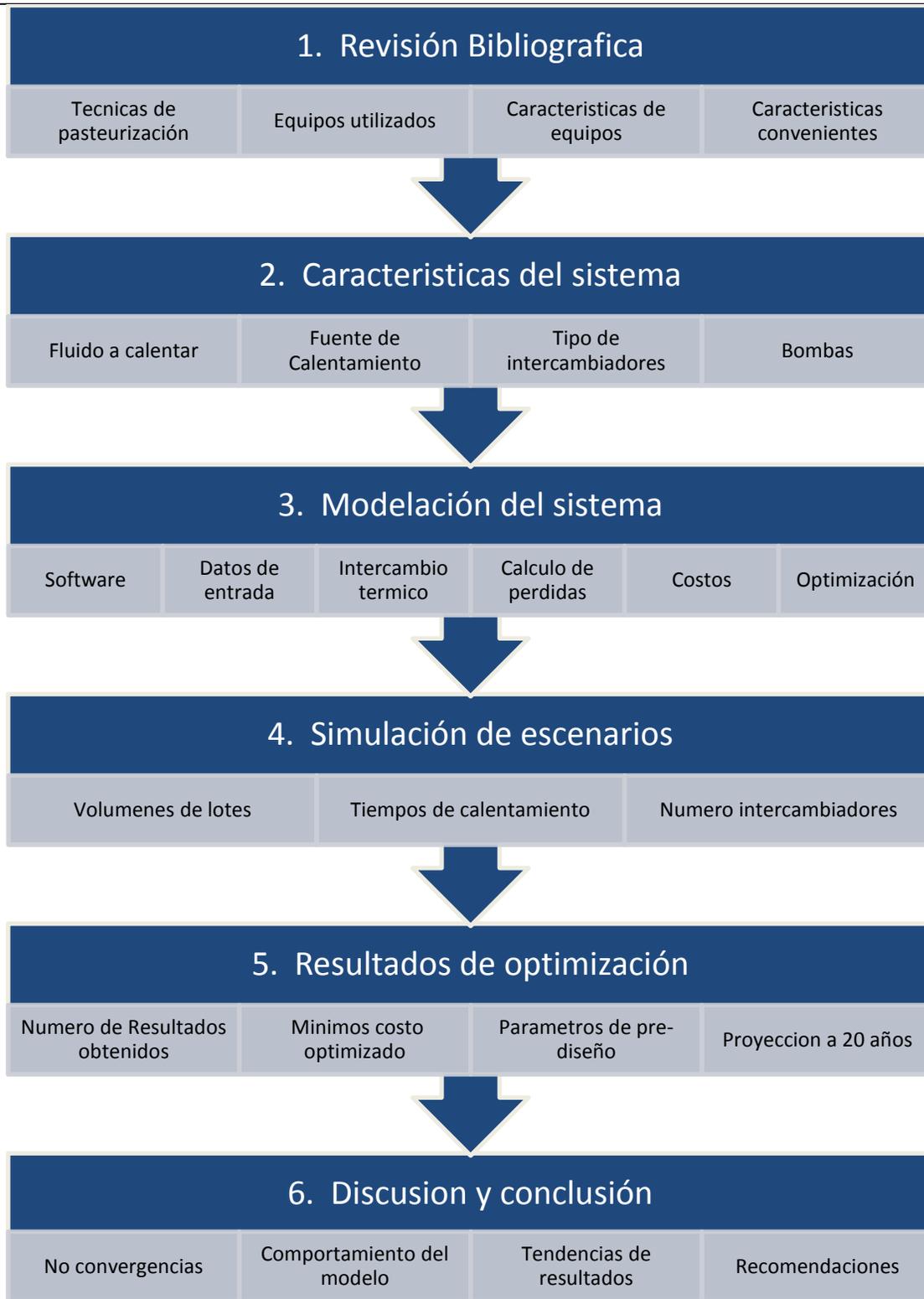


Ilustración 8 Organización secuencial del trabajo de tesis

Desarrollo

Es poco recomendable el tratar de diseñar y optimizar sistemas o dispositivos termomecánicos mediante prueba y error.

Una metodología más moderna y científica consiste en desarrollar modelos matemáticos, basados en las ecuaciones que describen el comportamiento de los dispositivos y sustancias de trabajo involucradas. Esto da origen a sistemas de ecuaciones de varios tipos (algebraicas, diferenciales, lineales, no lineales, etc.) que están interrelacionadas mediante variables que representan características físicas de los dispositivos modelados o propiedades de los fluidos o flujos.

Estos sistemas de ecuaciones tienen entonces que ser resueltos simultáneamente para obtener un conjunto de valores de las variables, que satisfacen el sistema de ecuaciones y a dicho conjunto se le denomina el “estado” del sistema.

Un estado del sistema es un punto de operación del mismo, que puede o no satisfacer el servicio que se espera del sistema. A cada punto de operación corresponde un costo de fabricación y operación, por lo que se requiere optimizar, variando los parámetros de diseño hasta obtener un diseño funcional que resulte en el mínimo costo, tanto de fabricación como de operación.

La ilustración 9 muestra el esquema del sistema sujeto a evaluación, en el se define el recipiente que contiene el volumen del lote a calentar, el arreglo de intercambiadores de calor, la dirección de los flujos y la fuente de calentamiento, así como las bombas recirculadoras.

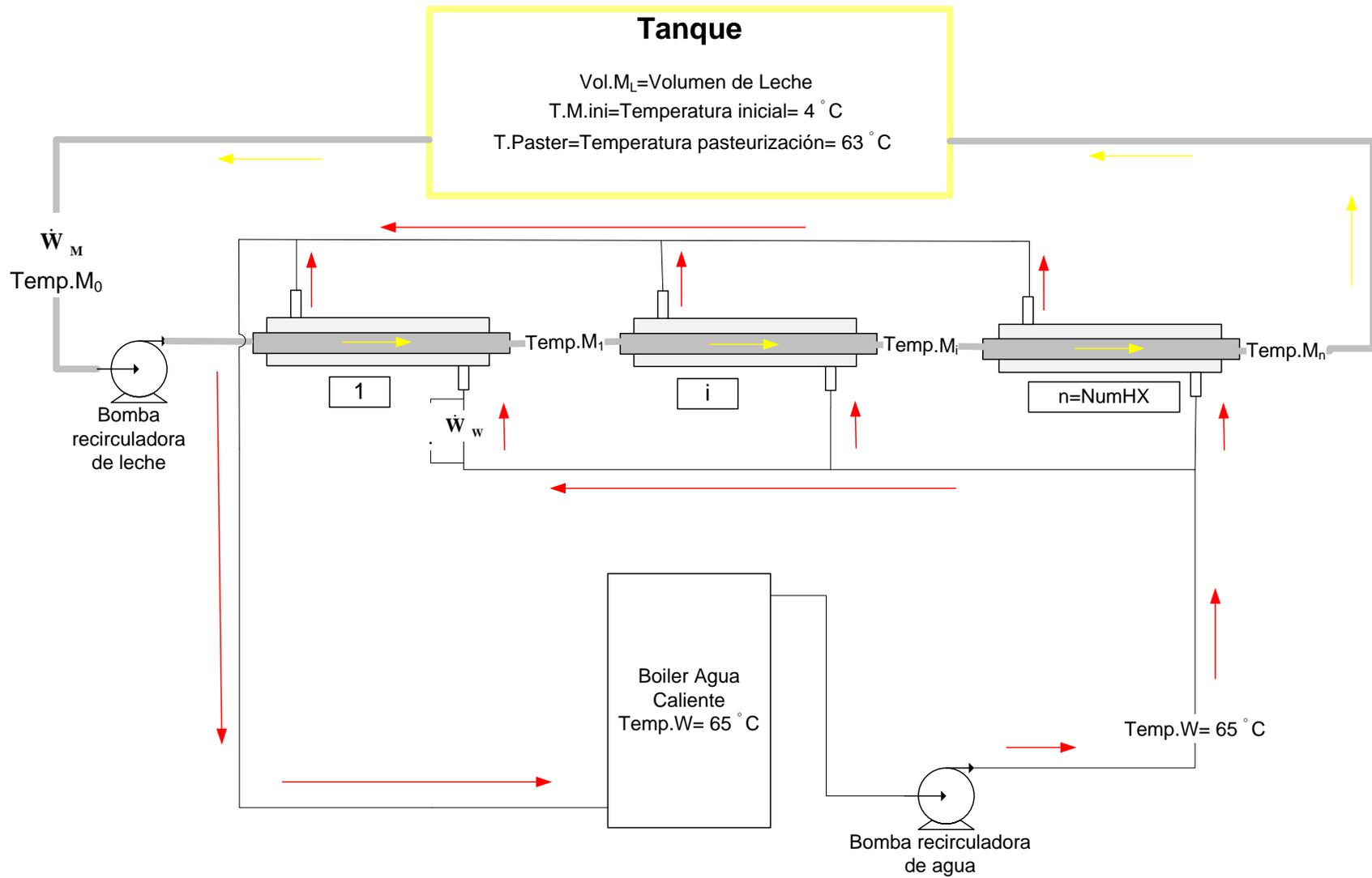


Ilustración 9 Esquema general de sistema

Software

Para este trabajo, se utilizó el paquete de cómputo Engineering Equation Solver, EES, de la empresa F-Chart Software. Es una plataforma de cálculo que permite resolver sistemas de ecuaciones, tanto algebraicas lineales o no lineales, como diferenciales. Produce graficas con calidad para publicación, calcula regresiones lineales y no lineales, optimización, conversión de unidades, revisión de consistencia y análisis de incertidumbre. Sus funciones internas incluyen propiedades termodinámicas y de transporte de muchas sustancias, incluyendo vapor, aire, refrigerantes y líquidos criogénicos, tablas JANAF de gases, hidrocarburos y psicrometricas.

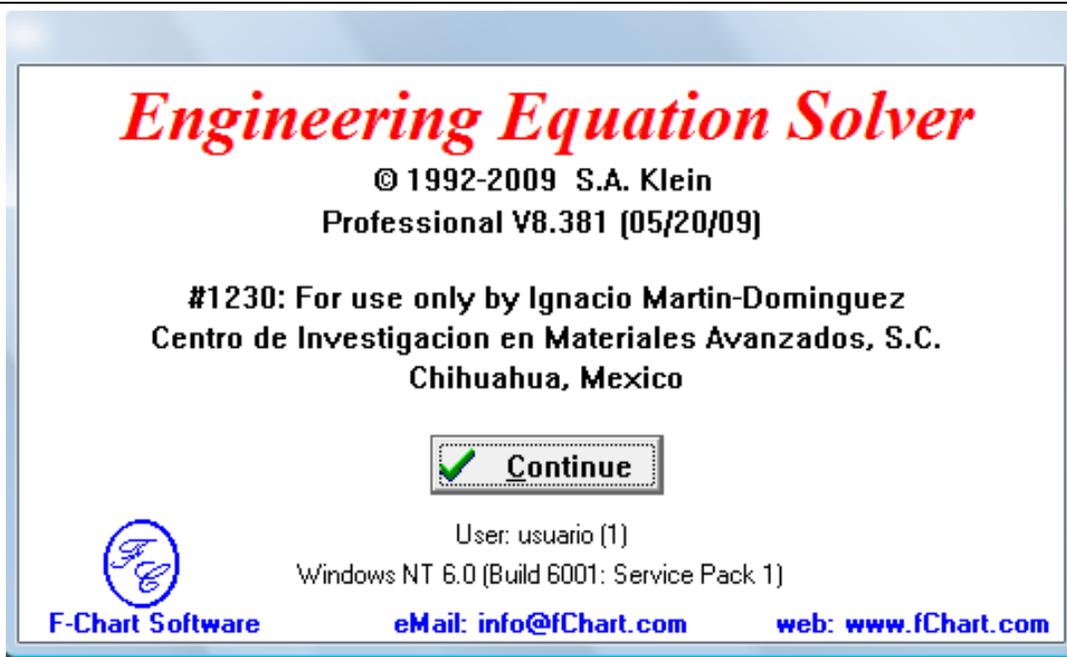


Ilustración 10 Portada EES

Criterios de simplificación del sistema modelado

Con el objeto de disminuir la complejidad en la modelación del sistema, relativa a condiciones particulares que se pueden presentar al instalar y operar el sistema de intercambiadores de calor, se optó por simplificar el modelo, asumiendo como constantes los siguientes factores que intervienen en éste proceso:

Contenedor de leche: Modelo del contenedor de leche (tina abierta) Se modela como reactor con mezclado instantáneo, las propiedades de la leche son constantes en todo el volumen ahí almacenado. La leche que retorna del sistema de intercambiadores de calor, se mezcla instantáneamente.

Pérdidas de calor: En este trabajo no se consideraron las pérdidas de calor hacia el medio circundante de los equipos. Esto se decidió para simplificar el análisis y considerando que en una etapa posterior, se podía incluir, para un análisis más detallado.

Suministro de calor al agua: El proceso de calentamiento del agua no se modela y se considera que se tiene disponibilidad ilimitada de agua caliente a temperatura constante, el costo de calentamiento de la leche tiene valor constante, solo varía la tasa de transferencia de calor.

Datos de entrada

En el modelo se consideraron como datos de entrada:

1. Volumen del lote a calentar
2. Tiempo de calentamiento
3. Temperatura inicial de leche
4. Temperatura de pasteurización
5. Temperatura de fluido de calentamiento
6. Numero de intercambiadores de calor
7. Costo de tubos
8. Tarifa eléctrica
9. Rugosidad de pared de tubos

Método de cálculo de intercambiador de calor

De los métodos para análisis y diseño de intercambiadores de calor, se eligió el método efectividad-NTU, que sirve para evaluar la rapidez de transferencia de calor y la temperatura de salida, a partir de flujos másicos y temperaturas de entrada conocidos, en un intercambiador de tamaño específico. Con este método se puede proponer las dimensiones de un intercambiador, indicar los flujos másicos y las temperaturas de entrada y con esto calcular la temperatura de salida (Çengel, 2004).

Sentido relativo de flujos dentro del intercambiador

para temperaturas de entrada y salida específicas, la diferencia media logarítmica para un intercambiador a contraflujo siempre es mayor que la correspondiente a flujo paralelo, lo que significa un área de transferencia relativamente menor, y que impacta en los costos de fabricación (Çengel, 2004), por lo que se propuso que el intercambiador sea a contraflujo.

Modelado de intercambio térmico

El intercambiador en todo momento debe cumplir con el balance de materia y energía, que aplica tanto a un intercambiador único, como a un arreglo de varios intercambiadores de calor.

$$\dot{Q} = \dot{m}_M C_{p_M} (\Delta T_M) = \dot{m}_W C_{p_W} (\Delta T_W)$$

Ecuación 1. Transferencia de calor en el intercambiador

Para el cálculo de intercambiadores de calor, se combinó el flujo másico y el calor específico para obtener la razón de capacidad calorífica:

$$C = \dot{m} C_p$$

Ecuación 2. Razón de capacidad calorífica

Para el método NTU (Numero de Unidades de Transferencia) se definió como la relación de la rapidez de transferencia de calor del intercambiador con relación a la rapidez máxima posible.

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}}$$

Ecuación 3 Efectividad por relación calórica

El programa EES cuenta con una función para el cálculo de la eficiencia del intercambiador, en función del sentido de los flujos, así como del número NTU y las razones de capacidad calorífica de los fluidos, se definió la función:

$$\varepsilon = f(\text{contraflujo}, \text{NTU}, \text{CapCal}_w, \text{CapCal}_M)$$

Ecuación 4 Efectividad

Se definió el número de unidades de transferencia, NTU como:

$$\text{NTU} = \frac{U A_{hx}}{C_{\min}}$$

Ecuación 5 NTU

El coeficiente global de transferencia de calor se calculó a partir de los coeficientes de transferencia de calor por convección para cada flujo. El coeficiente de transferencia de calor por conducción de la tubería de acero inoxidable se despreció, debido a su alta conductividad térmica, así como su bajo valor de espesor:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_M} + \frac{1}{h_W}$$

Ecuación 6 Coeficiente total de transferencia de calor

Los coeficientes de transferencia de calor convectivo se obtuvieron de su relación con el número de Nusselt para tubos circulares:

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

Ecuación 7 Coeficiente de transferencia de calor convectivo

Para EL número de Nusselt, se utilizó la correlación de Colburn, considerando que se trata de flujo en conducto, turbulento y con una diferencia de temperaturas baja,

$$\text{Nu} = 0.023 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.3}$$

Ecuación 8 Nusselt Ecuación de Colburn

Los números de Reynolds y Prandtl se modelaron como:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Ecuación 9 Numero de Reynolds

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot C_p}{k}$$

Ecuación 10 Numero de Prandtl

Propiedades de fluidos

Se realizó una investigación para analizar los cambios de las propiedades de ambos fluidos en función de la temperatura, en algunos casos solo fue posible conseguir un valor único, en otros casos se obtuvo información de correlaciones de datos experimentales, que posteriormente se ajustaron a una función.(Fernández, Montes, 1972)

Tabla 7 Propiedades de fluidos			
Propiedad	Símbolo	Leche	Agua
Viscosidad	μ	F	F
Conductividad térmica	k	F	F
Nº de Prandtl	Pr	F	F
Capacidad térmica	Cp	C	F
Densidad	ρ	C	F

C = constante, F = ajustado de correlación experimental

Aumento de temperatura en el recipiente de leche

La leche que fluye por el intercambiador, va a aumentar su temperatura al recibir la energía calorífica transferida desde el agua caliente, al regresar la leche al recipiente, se mezcla con la leche del recipiente provocando un aumento de temperatura de la masa total.

La variación de la temperatura de la masa de leche se modeló como:

$$\frac{dT_M}{dt} * m_M = \dot{m} (T_{M,i} - T_{M,0})$$

Ecuación 11 Derivada de variación de temperatura en el depósito de leche con respecto al tiempo

El aumento de temperatura de la leche en el depósito se debe realizar en un tiempo determinado, este aumento se modeló mediante una ecuación que integra el cambio de temperatura desde el inicio hasta el tiempo determinado en los datos de entrada:

$$T_{Tina} = T_{Tina,ini} + \int_0^{tiempo} \frac{dT_M}{dt} dt$$

Ecuación 12 Variación de temperatura en el depósito de leche con respecto al tiempo

Condiciones limite del modelo

Para efectos de cálculo se restringió el valor mínimo de diámetro de tuberías a ½”, que es el valor más pequeño utilizado comercialmente para éste tipo de aplicaciones. Esto se hizo para evitar que el optimizador considerara diámetros no disponibles en el mercado, de igual forma se restringió el diámetro máximo de tubería en 4 “.

En la práctica, se ha observado que velocidades mayores a 7.5 m/s provocan perdidas por fricción excesivas en las tuberías, por lo que se definió que ésta fuera la mayor velocidad posible para la optimización.

Costos de Fabricación y Operación

Costo de fabricación

Para el costo de fabricación, se tomo como base de cálculo el costo por metro de la tubería de cada diámetro estándar.

Con el objetivo de evitar discontinuidades en el proceso de optimización, se configuró el software para que durante el optimizado en costos, se modificaran los valores los diámetros de forma continua y no con valores discretos.

De proveedores locales se obtuvo cotización de tubería de distintos diámetros comerciales y con esto se realizó un ajuste a una función polinómica. En la sección de apéndice aparece la tabulación y la función obtenida.

La ilustración 11 muestra la grafica de la función del costo de la tubería.

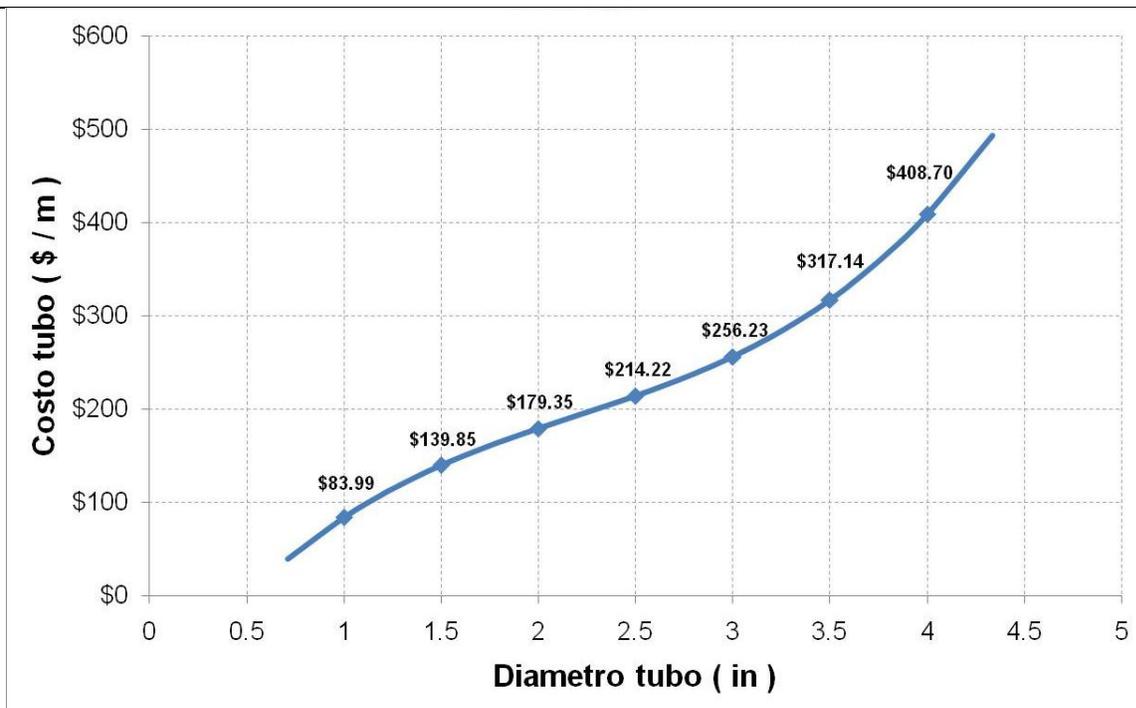


Ilustración 11 Función costo tubo acero inoxidable

Tanto para el costo del tubo interior como el tubo exterior, se utilizó la función *costo tubo*, en función del diámetro que se obtuvo de la optimización en costos, multiplicado por la longitud de dicho intercambiador. La ecuación de la función *Costo Fabricación* aparece en la sección de apéndice.

Costo de Operación

Al no considerarse las pérdidas de calor hacia el medio ambiente, el costo unitario requerido para calentar la leche, desde 4°C hasta 63°C, es un valor constante en pesos por litro (\$ / L) para todos los casos analizados y se excluye de las variables utilizadas para optimizar el sistema.

La variable del costo de operación es entonces solo el costo incurrido para hacer fluir la leche a través del tren de intercambiadores de calor a velocidad constante. Las pérdidas por fricción entre la leche y el agua de calentamiento con sus respectivas paredes de los intercambiadores de calor, están determinadas en función de los

diámetros y longitudes de los intercambiadores, así como de la velocidad de los flujos y la rugosidad el material.

Calculo de perdidas

Las pérdidas de carga se obtuvieron con la ecuación de Darcy-Weissbach y el factor de fricción mediante la versión electrónica del diagrama de Moody, disponible como rutina interna en EES.

$$Per = FF \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 13 Perdidas por fricción flujo frio

Calculo factor de fricción

Para el cálculo del factor de fricción, se utilizó la función *MoodyChart* de EES utilizando para el cálculo, el Número de Reynolds y el valor de rugosidad estándar ($4.5E10^{-6}$ m) para acero inoxidable.

$$FF = \text{MoodyChart}(Re, RR)$$

Ecuación 14 Calculo factor de fricción

Calculo de potencia para desplazar los flujos

Utilizando la ecuación de la bomba (obtenida de la ecuación de la energía, ver en apéndice), se calculó la potencia requerida tanto para la bomba que desplaza el flujo de leche, como la que desplaza el flujo de agua.

$$Pot = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot Per$$

Ecuación 15 Potencia para desplazar los flujos

La potencia mecánica requerida para accionar las bombas que impulsan los flujos de leche y agua se calentamiento, se expresaron como:

$$Pot_{tot} = Pot_M + Pot_W$$

Ecuación 16 Potencia mecánica total

Costo de electricidad

Se consideró que el conjunto bomba-motor eléctrico tiene una eficiencia de 80%, por lo tanto la potencia eléctrica demandada por el equipo es:

$$Potencia_e = \frac{Potencia_{tot}}{\eta}$$

Ecuación 17 Eficiencia de bombas

El costo de operación diario por consumo eléctrico para bombeo es:

$$CostoOperacion = \frac{Potencia_{tot} * TarifaElectrica * Tiempo_h * 365}{0.80}$$

Ecuación 18 Función costo operación

Costo Total

Finalmente se sumaron los costos de fabricación y operación por un año, para obtener el costo total.

$$CostoTotal = Costo fabricaci3n + CostoOperaci3n$$

Ecuaci3n 19 Costo total

Costo Unitario

Debido a que en el estudio se analizaron diferentes tamaños de lotes de leche (L/día), los costos anuales vinculados en todos los casos se expresaron por unidad de leche procesada.

El costo total unitario fue el indicador principal, la función objetivo, que se utilizó en el análisis de costos. Este costo está formado por la suma del costo unitario de fabricación más el costo unitario de operación.

La ecuación 20 muestra el cálculo del costo unitario de fabricación.

$$\text{Costo fabricación unitario} = \frac{\text{Costo fabricación}}{(365) (\text{Volumen diario})}$$

Ecuación 20 Costo unitario de fabricación

Igualmente, la ecuación 21 muestra el cálculo del costo unitario de operación.

$$\text{Costo operación unitario} = \frac{\text{Costo operación}}{(365) (\text{Volumen diario})}$$

Ecuación 21 Costo unitario de operación

La ecuación 22 muestra el cálculo del costo unitario total, nuestra función objetivo:

$$\text{Costo total unitario} = \text{Costo instalación unitario} + \text{Costo operación unitario}$$

Ecuación 22 Costo total unitario

Costo Penal

La función objetivo a minimizarse es el costo total unitario, pero al optimizarse conduciría a una solución trivial: diámetros, longitudes y velocidades de flujo con valor cero tienen el valor total mínimo.

Para obligar al optimizador a encontrar una solución que minimice los costos, pero que garantice el que el volumen de leche alcance la temperatura de pasteurización, se le agregó a la función objetivo un costo de penalización. Este costo considera la diferencia entre la temperatura alcanzada por la leche al cabo del proceso de

calentamiento y la temperatura de pasteurización (63°C) y penaliza fuertemente su magnitud. Forzando con ello al optimizador a buscar otra solución más económica.

$$\text{Costo.Penal} = \text{ABS}(\text{Temp.Paster} - \text{Temp}_{M,0}) * 10000$$

Ecuación 23 Costo penalización

Costo Optimizado

Finalmente, el costo a optimizar, que se denominó costo optimizado, quedó conformado por la función objetivo, el Costo total unitario, más el costo de penalización.

$$\text{Costo.Optim} = \text{Costo.Tot} + \text{Costo.Penal}$$

Ecuación 24 Costo optimizado

Optimización

Para la optimización, se utilizó la función Min-Max de EES. Dentro de ésta función, el método seleccionado de las opciones de EES fue el de métrica variable. Un algoritmo basado en el método Newton-Raphson, utilizado para encontrar la pendiente cero de una función. Las variables a modificar durante la optimización fueron:

1. Diámetro Interior
2. Diámetro Exterior
3. Longitud de Intercambiador
4. Velocidad de leche
5. Velocidad de agua

La ilustración 12 muestra la ventana de EES en el momento de la optimización.

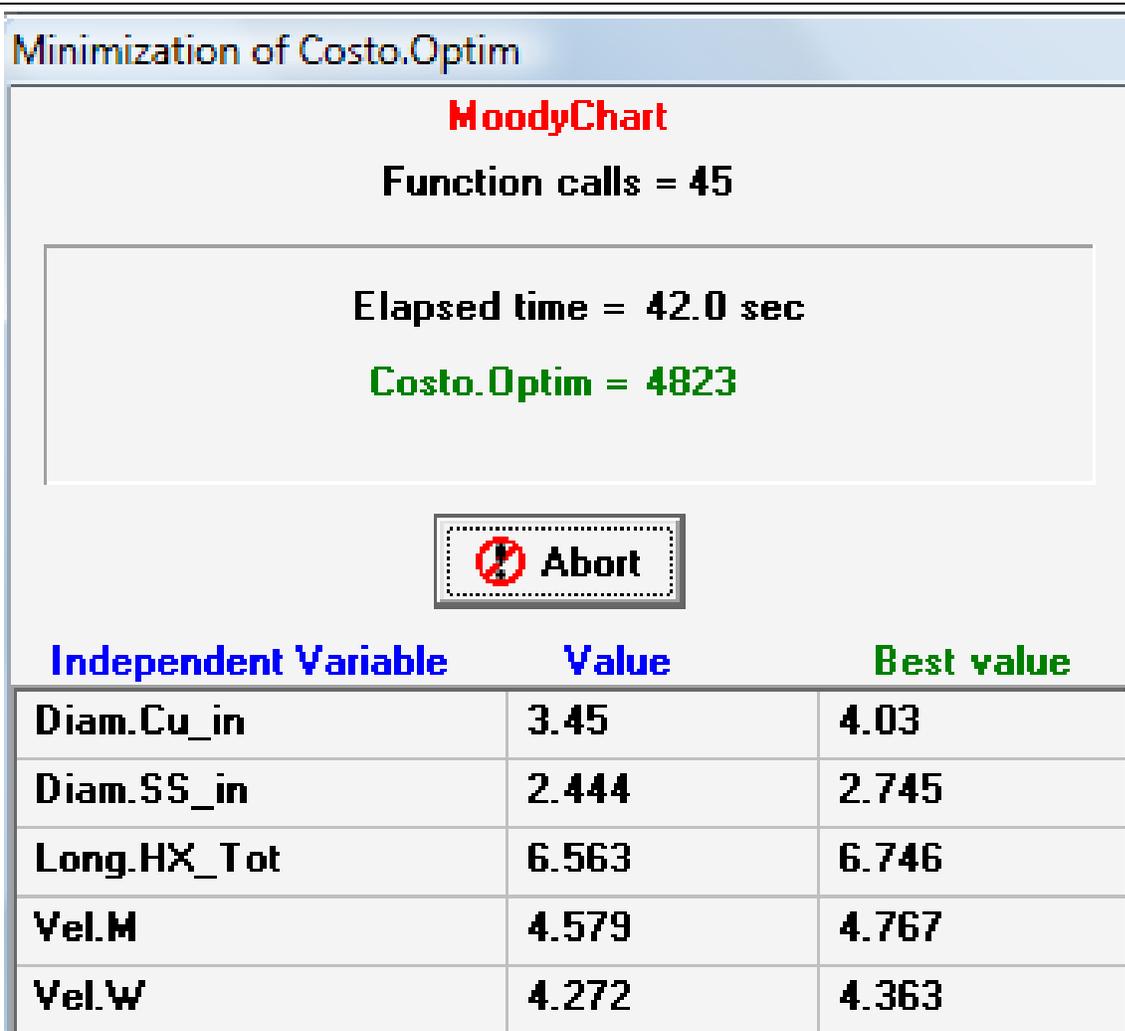


Ilustración 12 EES optimizando

Operación del sistema de optimización

El trabajo de modelación consistió en representar, mediante un juego de ecuaciones, los distintos parámetros que intervienen en el sistema.

En la integración del código de ecuaciones, se representaron todos los aspectos importantes relacionados, tales como:

- Introducción, conversión y conversión de datos de entrada para alinear dimensiones al sistema internacional.
- Funciones dependientes de la temperatura que modifican las propiedades de los flujos.
- Determinación de geometría de intercambiador, flujos y números adimensionales
- Modelación del intercambio térmico
- Calculo de temperatura lograda en el depósito de leche en el tiempo determinado.
- Calculo de factor de fricción y perdidas por fricción
- Calculo de potencia mecánica de las motobombas para desplazar los flujos.
- Calculo de costos de instalación, operación y penal
- Determinación de costo unitario

Siempre respetando la regla de igual número de ecuaciones y variables.

EES tiene la capacidad de ordenar las ecuaciones, agrupándolas por bloques para su cálculo. La ilustración 13 muestra el orden esencial utilizado para el cálculo de optimización

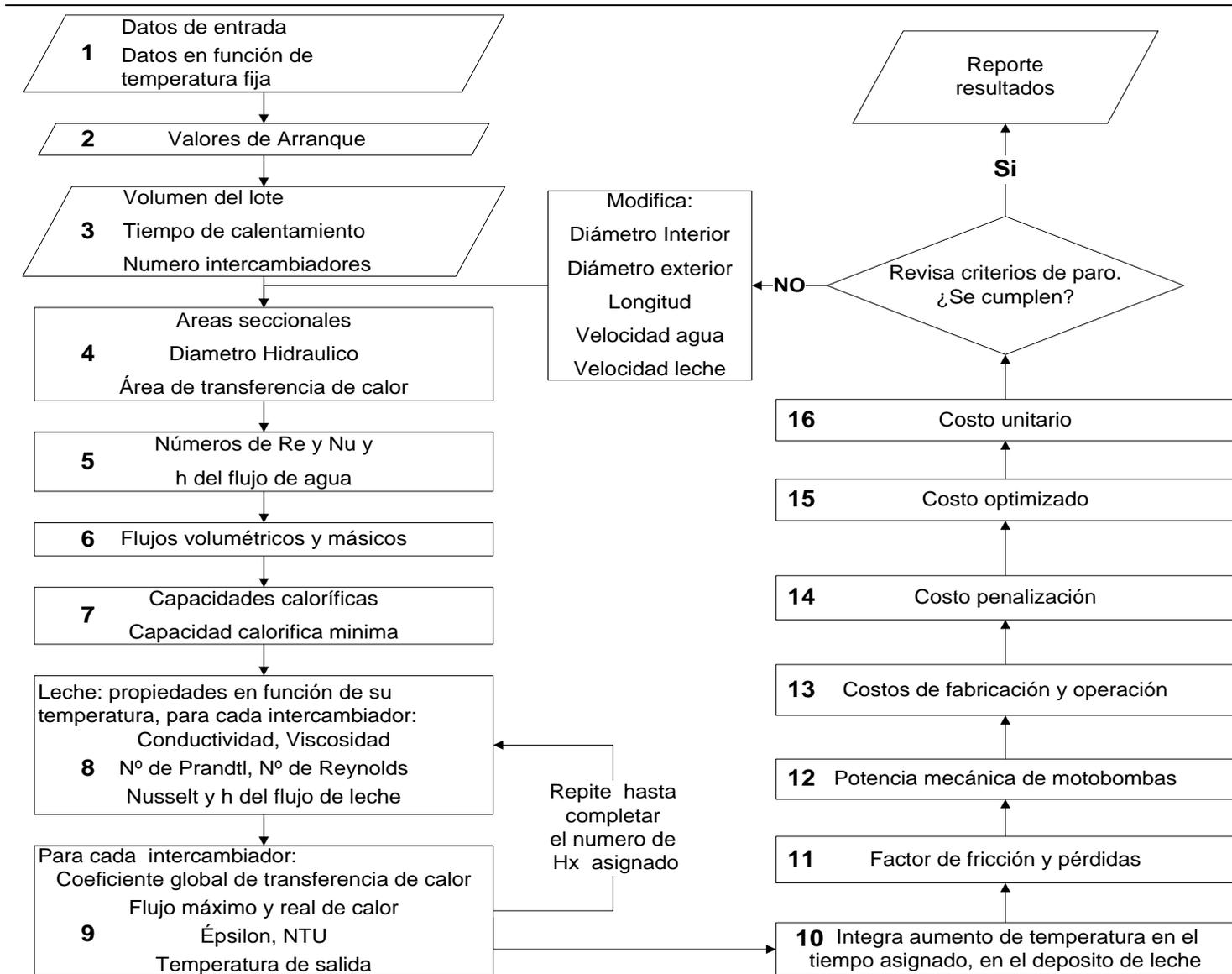


Ilustración 13 Ciclo de cálculo de optimización en costos

Bloque 1

Datos que se introdujeron directamente:

Dato	Valor	Unidades
Costo de tarifa eléctrica	0.7215	\$/kW-h
Rugosidad de acero inoxidable	.000045	m
Espesor de pared de tubo	0.001651	m
Temperatura de pasteurización	63	°C
Temperatura inicial de leche	4	°C
Temperatura de agua de calentamiento	65	°C
Cp leche	3890	J / kg °C
Densidad leche	1040	Kg / m ³

Datos obtenidos en función de temperatura de fluido de calentamiento. Estos valores funcionan en el cálculo como constantes, porque la temperatura del agua de calentamiento es contante, pero se conservaron en el modelo porque sus valores se modifican al cambiar la temperatura del fluido de calentamiento.

Dato	Valor Calculado por la función	Unidades
Cp del agua	4185	J / kg °C
Densidad del agua	980.6	Kg / m ³
Conductividad térmica del agua	0.6456	J / s °C m
Viscosidad del agua	0.0004321	Kg / m s
Prandtl del agua	2.795	-

Bloque 2

El optimizador define valores de arranque para las 5 variables señaladas para modificarse durante la optimización.

- Diámetro Interno
- Diámetro externo
- Longitud
- Velocidad de flujo leche
- Velocidad de flujo agua

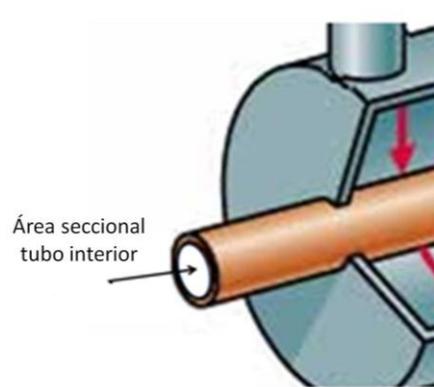
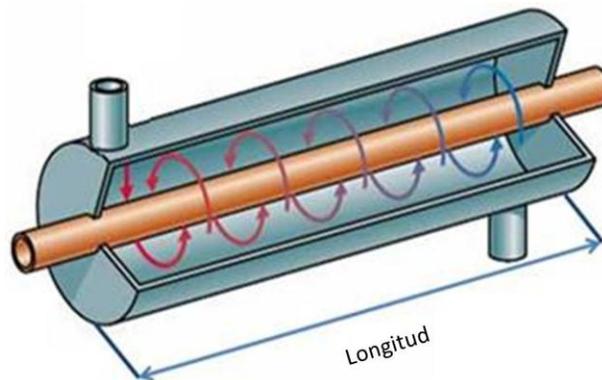
Bloque 3

Datos asignados para simular escenarios

Parámetro	Valor Insertado	Unidades
Volumen del lote de leche	250-3000	litros (incrementos de 250)
Numero de intercambiadores	1-6	
Tiempo de calentamiento	30-60-90	minutos

Bloque 4

A partir de los valores asignados para longitud y diámetros, el optimizador “construye” el intercambiador de calor. Se definen sus dimensiones, el área seccional para cada flujo y el área de transferencia de calor.



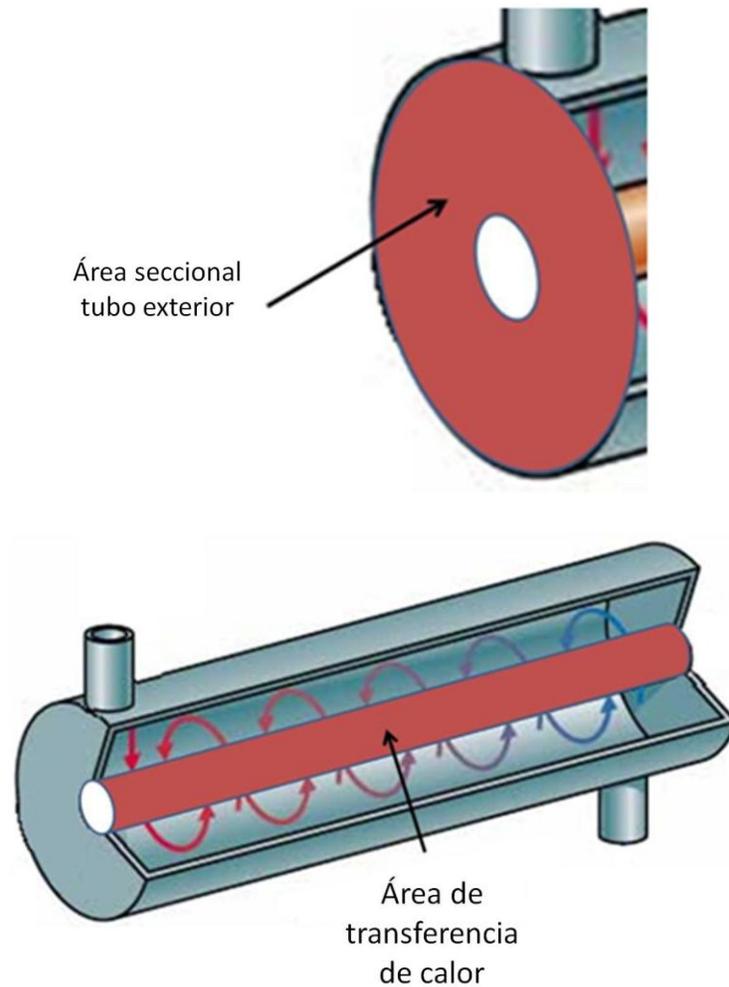


Ilustración 14 Dimensionamiento de intercambiador

Bloque 5

Combinando el valor asignado para la velocidad del flujo de agua, el diámetro hidráulico definido en el bloque anterior y las propiedades de éste fluido, el optimizador define su coeficiente de transferencia de calor convectivo.

Este coeficiente queda definido en esta etapa temprana del ciclo debido a que las propiedades del agua están en función de su temperatura, que en todos los intercambiadores tiene el mismo valor de 65 °C a la entrada de cada intercambiador y como se tiene un acomodo de intercambiadores en serie, la temperatura de salida de cada intercambiador es irrelevante porque va de regreso al calentador de agua.

El coeficiente de transferencia de calor convectivo para el flujo de leche, se calcula posteriormente para cada intercambiador de calor, debido a que al ir aumentando ésta su temperatura, van cambiando los valores de sus propiedades físicas y térmicas, por consecuencia éste coeficiente cambia para cada intercambiador.

Bloque 6

Con los valores de áreas y velocidades calcula los flujos volumétricos y posteriormente, con los valores de las densidades calcula los flujos máxicos.

Bloque 7

Comienza los cálculos para el intercambio térmico. Calcula las capacidades caloríficas de ambos flujos a partir de sus flujos máxicos y su C_p , luego los compara para obtener la capacidad mínima, estas capacidades no se ven afectadas por los cambios de temperatura.

Bloque 8

Calcula las propiedades mecánicas y térmicas de la leche y el coeficiente de transferencia de calor por convección para el intercambiador de calor.

Bloque 9

Calcula el coeficiente global de transferencia de calor del flujo de leche, combinándolo con el coeficiente del flujo de agua calculado en el bloque 5. Obtiene los valores de flujo de calor máximo y real para el intercambiador de calor.

Calcula la eficacia (épsilon) del intercambiador en función de la relación del calor transferible real comparado con el calor transferible máximo posible.

Calcula el valor del NTU del intercambiador (es igual para todos los intercambiadores porque el área de intercambio de calor es igual y la capacidad calorífica mínima es la misma por ser el mismo flujo máxico y el mismo C_p).

Calcula la temperatura de salida del flujo de leche del intercambiador de calor.

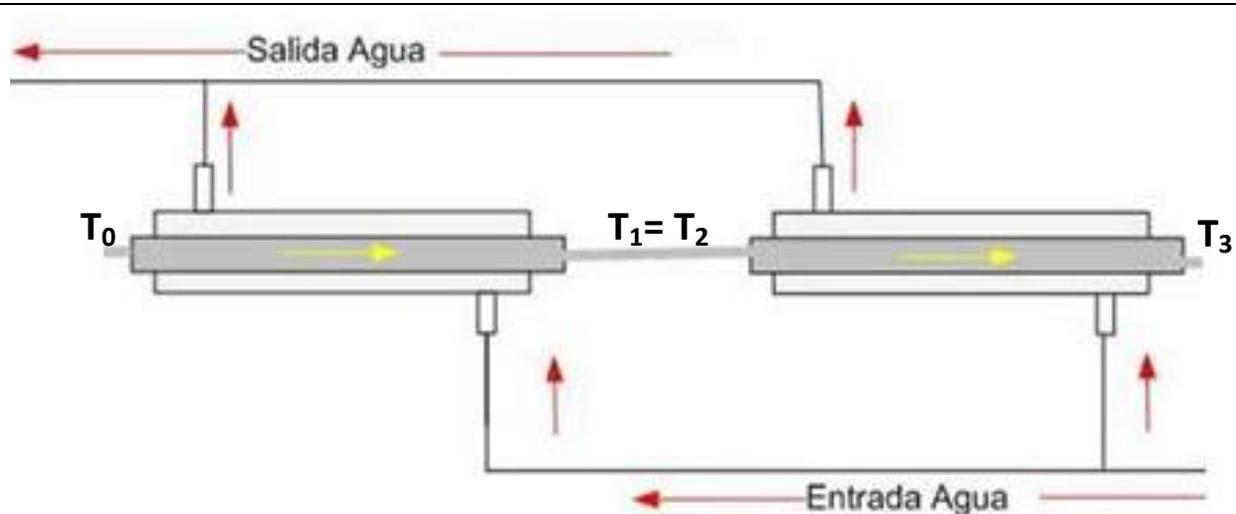


Ilustración 15 Temperaturas de salida y entrada entre intercambiadores de calor

La ilustración 15 muestra como la temperatura de salida del primer intercambiador es la temperatura de entrada del siguiente, por lo que durante la ejecución, se forma un ciclo de cálculo entre los bloques 8 y 9 en el que la temperatura de salida del primer intercambiador de calor, define las condiciones para el cálculo del siguiente y así repite hasta completar el número de intercambiadores de calor asignado en los datos de entrada. En el caso del primer intercambiador, la temperatura de entrada es la del depósito de leche.

Bloque 10

El flujo de leche que retorna de la salida del último intercambiador de calor al depósito de leche y que lleva la energía térmica recibida, se mezcla con la leche del recipiente aumentando gradualmente su temperatura.

Este aumento de temperatura se sigue dando hasta que se cumple el tiempo asignado para el calentamiento.

Bloque 11

Se calcula el factor de fricción y las pérdidas por la fricción con la rugosidad del acero inoxidable de ambos flujos al transportarse a través de sus respectivas áreas seccionales a velocidad constante (la asignada por el optimizador).

Bloque 12

Se calcula la potencia mecánica de las motobombas necesaria para desplazar los flujos a fin de conservar las velocidades.

Bloque 13

Se calculan los costos de fabricación por medio de la función costo tubo de acero inoxidable y operación por medio de la tarifa eléctrica y ponderando la eficiencia de las motobombas.

Bloque 14

Calcula el costo de penalización en caso de no haber logrado llegar a la temperatura de pasteurización.

Bloque 15

Calcula el costo optimizado que como se mencionó, es la suma de todos los costos

Bloque 16

Calcula el costo unitario

Condiciones de paro

Una vez que ha calculado el costo unitario, el optimizador lo compara con el resultado del ciclo anterior y revisa las condiciones de paro, en caso de que no se cumplan, reinicia el ciclo modificando las variables que le están permitidas.

Ajustes de paro del optimizador

Los valores optimizados fueron los mismos independientemente del valor de arranque determinado.

Los criterios de paro fueron:

- Cambio en variables $< 1.0E-06$
- Numero de iteraciones >2000
- Tiempo transcurrido (segundos) < 3600

Simulación de escenarios.

Para la simulación de los escenarios a optimizar, se consideraron 3 variables para trabajar con distintas combinaciones de valores:

1. Volumen del lote
2. Tiempo de calentamiento
3. Numero de intercambiadores de calor

Volumen del lote: Considerando atender las necesidades de diseño del grupo de los pequeños productores, se consideraron varios volúmenes de leche a pasteurizar por lote, que van desde los 250 litros hasta los 3000 litros con incrementos de 250 litros.

Tabla 8 Volúmenes por lote a calentar	
Volumen de lote (L)	
	250
	500
	750
	1000
	1250
	1500
	1750
	2000
	2250
	2500
	2750
	3000

Tiempos de Calentamiento. Ante la necesidad de los pequeños productores de definir un tiempo determinado para el proceso de calentamiento, puesto que no existía un tiempo definido para esto y se desconocía la importancia de un mayor o menor tiempo, se determinó analizar los costos optimizados para 3 tiempos de calentamiento.

Tabla 9 Tiempos de calentamiento	
Tiempo de Calentamiento (min)	
	30
	60
	90

Numero de Intercambiadores de calor: Se propuso evaluar el efecto de seccionar el intercambiador en hasta 6 secciones con sus respectivas entradas y salidas de agua de calentamiento. Para efectos prácticos los nombramos como numero de intercambiadores.

Tabla 10 Numero de Intercambiadores de calor	
Numero de Intercambiadores de calor	
	1
	2
	3
	4
	5
	6

De este modo quedó definido el número de escenarios a optimizar: 12 volúmenes de lote, 3 tiempos de calentamiento y hasta 6 intercambiadores de calor generaron 216 combinaciones.

Optimizando escenarios

Se procedió a introducir los datos en el optimizador de EES de acuerdo a las condiciones de cada escenario a fin de ejecutar las corridas para obtener los parámetros de diseño del intercambiador de calor con el mínimo costo.

Se hizo una tabulación con los resultados obtenidos. Para facilitar la interpretación de los mismos, en la sección de resultados se muestra la información en forma grafica de acuerdo a cada enfoque de análisis. La tabla de resultados completa se muestra en la sección de apéndice.

Resultados

Como resultado de la optimización de las 216 combinaciones, se obtuvo convergencia en 164 corridas (75.9 %). El resto se reportó como falla durante el proceso de optimización.

La siguiente ilustración muestra el número de resultados obtenidos para cada volumen de lote.

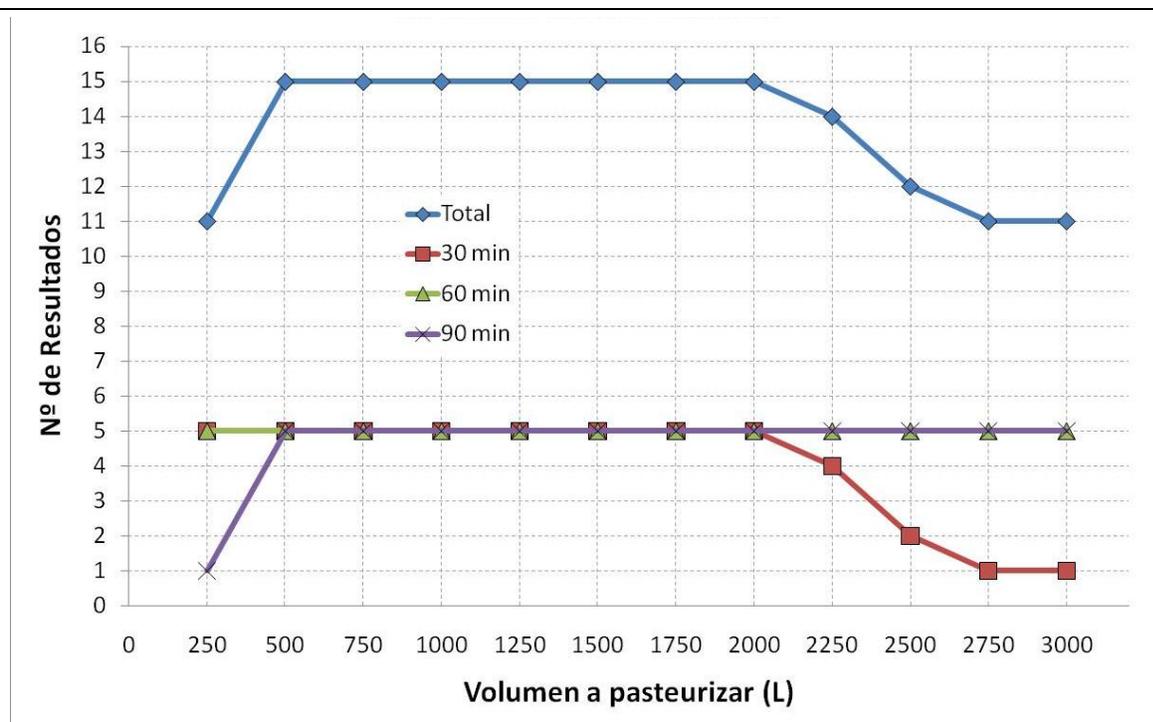


Ilustración16 Convergencia de resultados

No se obtuvo la convergencia en las corridas de optimización en 3 condiciones:

- Cuando se utilizó 1 intercambiador. No se obtuvo convergencia en ninguna de las 36 combinaciones que incluyeron como condición 1 intercambiador de calor solo.
- Cuando se optimizó un volumen de lote pequeño en un tiempo largo, con un total de 4 corridas.
- Cuando se optimizó un volumen grande en un tiempo corto, con un total de 12 corridas.

La tabla 11 muestra el desglose de las condiciones en las que no se obtuvieron resultados de las corridas de optimización.

Tabla 11 Condiciones en que no se obtuvieron resultados	
Condición	No resultados no obtenidos
Utilizando 1 intercambiador.	36
250L y 90 min	4
2250 y 30 min	1
2500 y 30 min	3
2750 y 30 min	4
3000 y 30 min	4
Total	52

Variables registradas

Para cada una de las corridas de optimización, se registraron los valores correspondientes a las siguientes variables:

- Numero de Intercambiadores de calor
- Tiempo de calentamiento
- Volumen a calentar
- Costo de fabricación
- Costo operación
- Costo total
- Costo penalización
- Costo Unitario
- Diámetro del tubo exterior
- Diámetro del tubo interior
- Longitud cada intercambiador
- Longitud total
- Velocidad del flujo a calentar
- Velocidad del flujo de calentamiento

Los datos completos de estos resultados se encuentran en apéndice.

Mínimos unitarios totales por número de Intercambiadores de calor

De los resultados obtenidos se observó que aunque la mayor parte de los mínimos totales se obtuvo con seis intercambiadores de calor, también se obtuvieron mínimos totales con números menores. La ilustración 17 muestra el número de costos mínimos obtenidos con relación al número de intercambiadores de calor

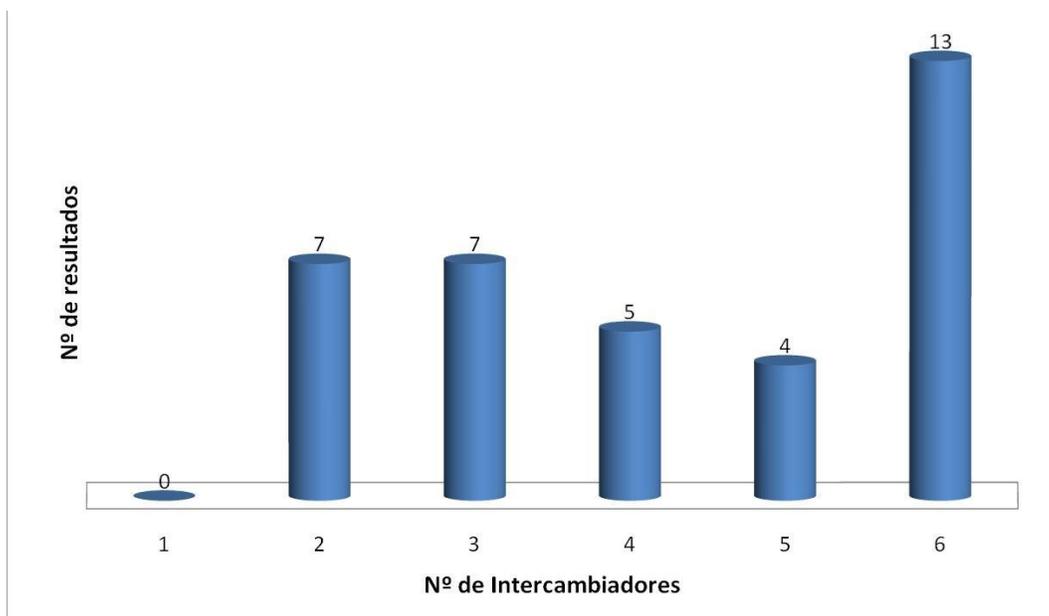


Ilustración 17 Mínimos totales por numero de intercambiadores de calor

Relación de costos con el tiempo de calentamiento.

Se observó una relación inversa del costo con el tiempo de calentamiento, el costo disminuye al aumentar el tiempo de calentamiento, esta relación se observa en todos los escenarios optimizados.

Las ilustraciones 18, 19 y 20 muestran ésta relación para 3 volúmenes a calentar. El total de graficas se muestra en la sección de apéndices.

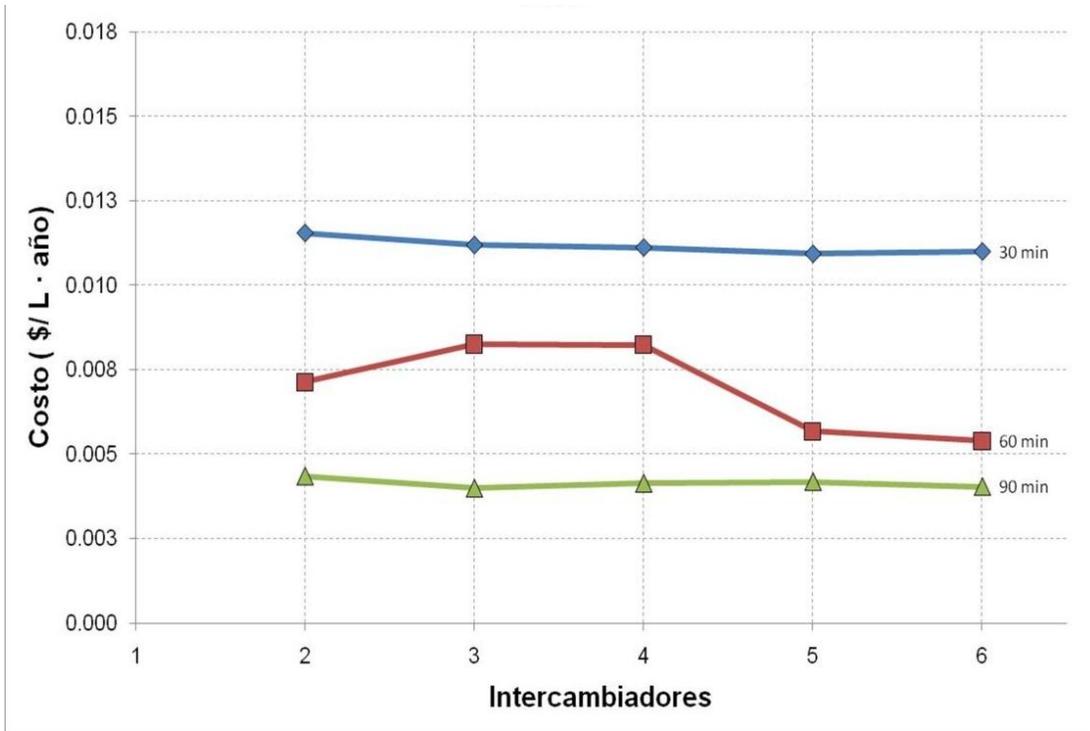


Ilustración 18 Costos totales unitarios para 500 L

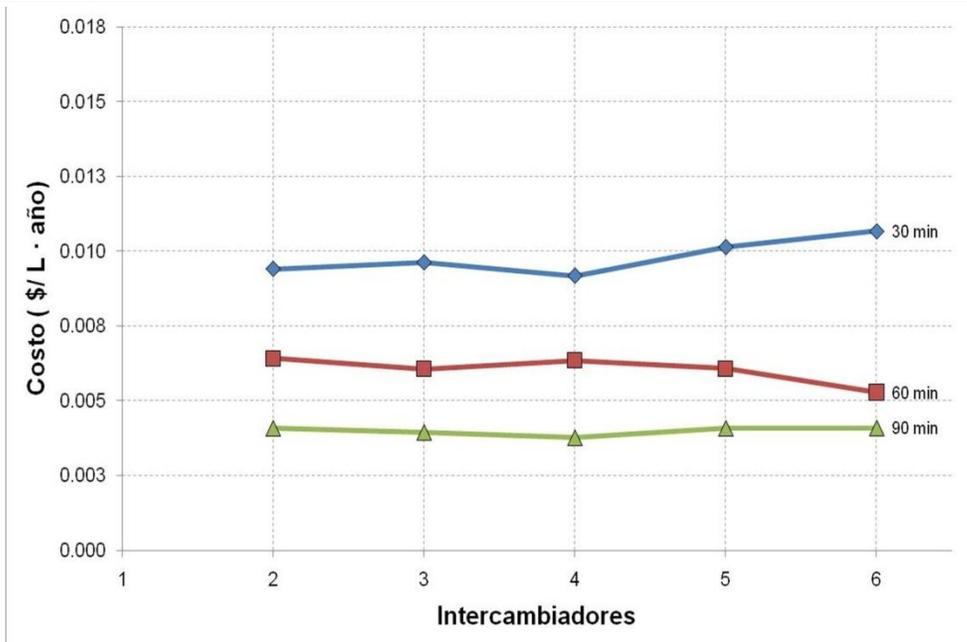


Ilustración 19 Costos totales unitarios para 1500 L

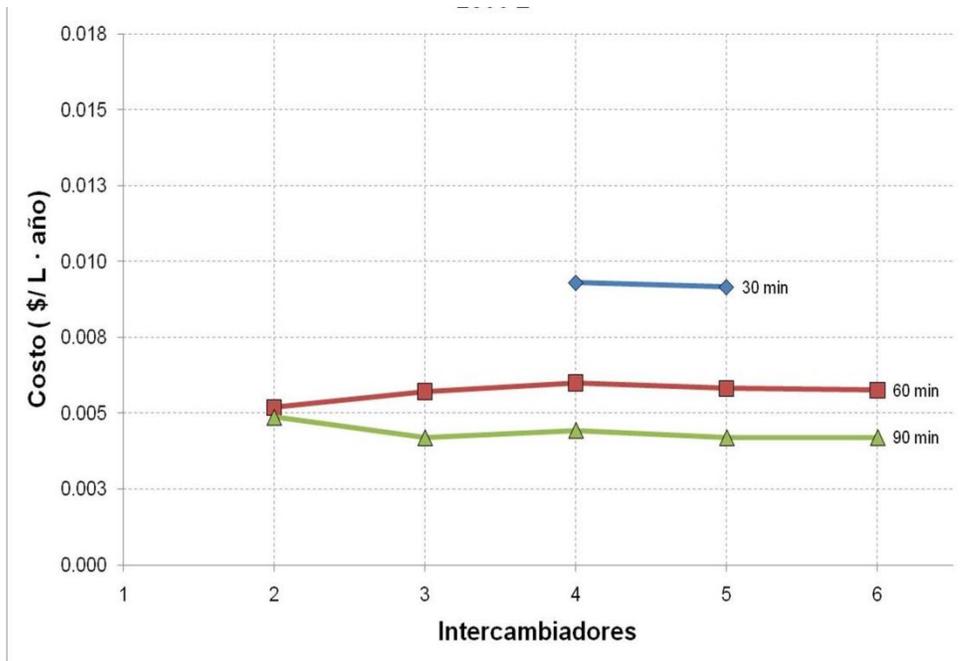


Ilustración 20 Costos totales unitarios para 2500 L

Relación de costos con el número de intercambiadores de calor

Se observó que el costo total unitario, en términos generales no es afectado significativamente por el número de intercambiadores de calor.

La ilustración siguiente muestra los costos totales unitarios para los distintos números de intercambiadores de calor para 30, 60 y 90 minutos (no se etiquetaron debido a su proximidad).

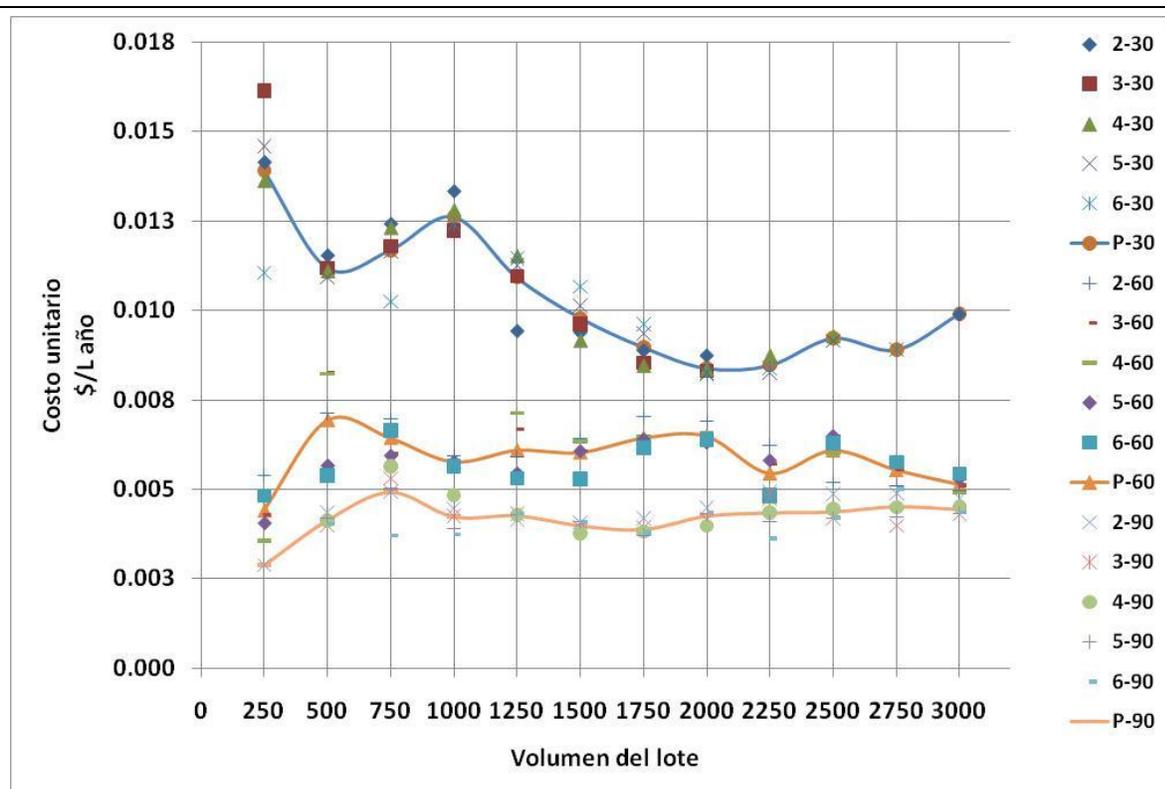


Ilustración 21 Efecto de número de intercambiadores de calor en costo total unitario

Costos totales unitarios mínimos.

De los resultados obtenidos de las corridas de optimización, se obtuvieron los valores de los costos totales unitarios mínimos para cada volumen a calentar y cada tiempo, aunque quedó definido que los menores costos son para el mayor tiempo de calentamiento, se presentan en la tabla 12 los valores mínimos para cada volumen de lote a calentar en los tres tiempos de calentamiento (columnas A, B y C).

En forma paralela se presentan los valores estandarizados, tomando como valor unitario el mínimo general, obtenido para 250 litros y 90 minutos (columnas A1, B1 y C1).

Tabla 12 Costos totales unitarios mínimos						
Volumen a calentar (L / día)	Costo mínimo (\$ / L · año)			Costo std. (Mínimo=1)		
	A	B	C	A1	B1	C1
	30 min	60 min	90 min	30min	60 min	90 min
250	0.0110	0.0035	0.0028	3.8	1.2	1.0
500	0.0109	0.0053	0.0039	3.8	1.9	1.4
750	0.0102	0.0059	0.0037	3.6	2.1	1.3
1000	0.0122	0.0056	0.0037	4.2	2.0	1.3
1250	0.0094	0.0053	0.0041	3.3	1.8	1.4
1500	0.0091	0.0052	0.0037	3.2	1.8	1.3
1750	0.0084	0.0061	0.0037	2.9	2.1	1.3
2000	0.0082	0.0062	0.0039	2.9	2.2	1.4
2250	0.0082	0.0062	0.0036	2.9	2.2	1.3
2500	0.0091	0.0051	0.0041	3.2	1.8	1.5
2750	0.0089	0.0050	0.0039	3.1	1.8	1.4
3000	0.0099	0.0048	0.0043	3.4	1.7	1.5

En la ilustración 22 se muestra la grafica de los datos de la tabla 12, en el eje izquierdo se expresa el valor del costo, en el eje derecho su valor proporcional al mínimo absoluto (250L y 90 min).

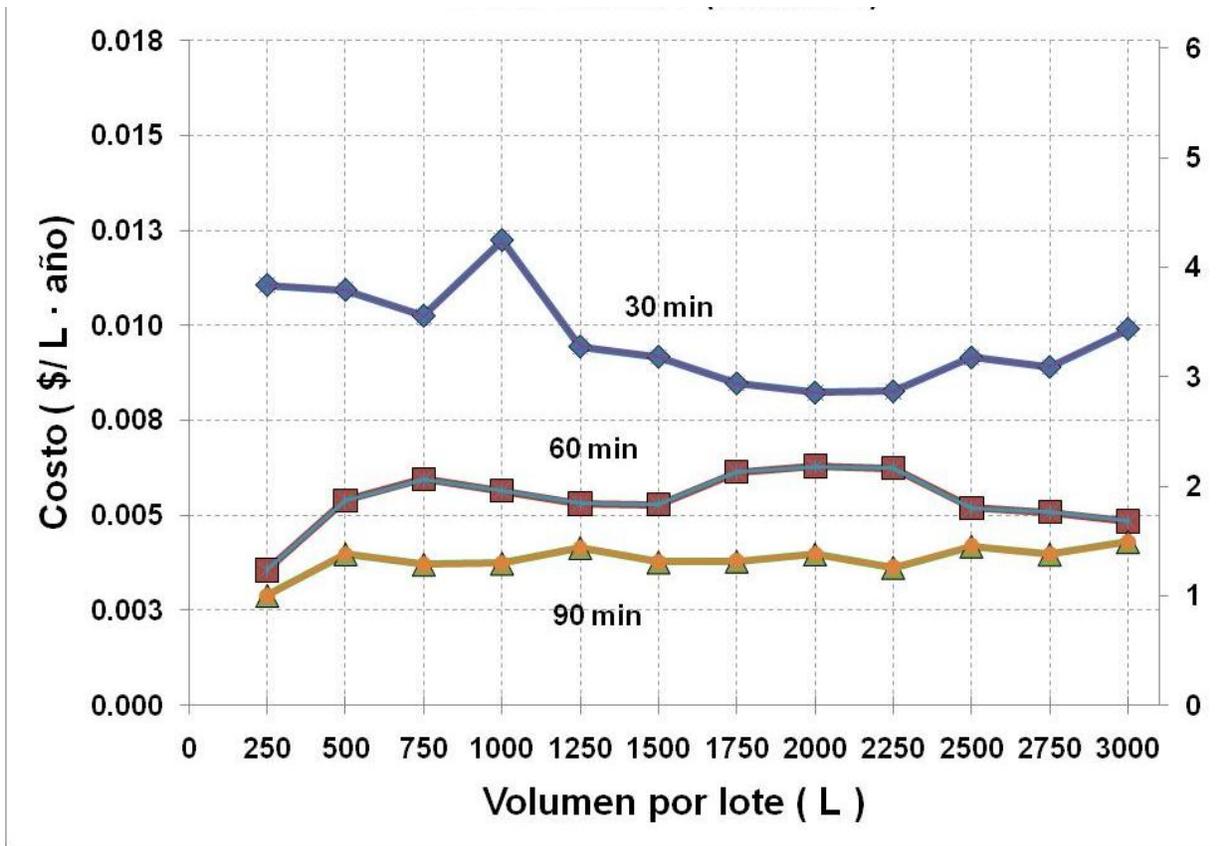


Ilustración 22 Costos totales unitarios mínimos

Parámetros de pre-diseño

Con los datos obtenidos por el optimizador, fue posible definir los parámetros de pre-diseño para todos los escenarios, como ejemplo, la tabla 13 muestra los parámetros de pre-diseño para el caso del volumen de lote de 2000 L y 30 minutos de tiempo de calentamiento.

Tabla 13 Parámetros de pre-diseño de intercambiador		
Dimensión	Valor	Unidades
Volumen de lote	2000	L
Tiempo de calentamiento	30	min
Numero de intercambiadores de calor	6	pieza
Diámetro interior	3.249	in
Diámetro comercial cercano (nombre/diámetro)	3 / 3.334	in
Diámetro exterior	3.811	in
Diámetro comercial cercano (nombre/diámetro)	3.5 / 3.834	in
Longitud total	8.53	m
Área intercambio de calor	2.1847	m ²
Potencia bomba leche (80% eficiencia)	1442.5	W
Potencia bomba agua (80% eficiencia)	1837.5	W

Proyección a 20 años

Resultó interesante analizar el comportamiento de esta optimización a más de un año, en donde se comparó el costo de fabricación con el costo de operación acumulado, sin considerar factores financieros.

La ilustración 23 muestra el mismo caso de 2000 L con 6 intercambiadores de calor y 30 minutos de tiempo de calentamiento. Al optimizar hasta 20 años, los costos de fabricación aumentan ligeramente al optimizar a mayor número de años, es decir el optimizador permite el diseño de un intercambiador con mayor área de transferencia.

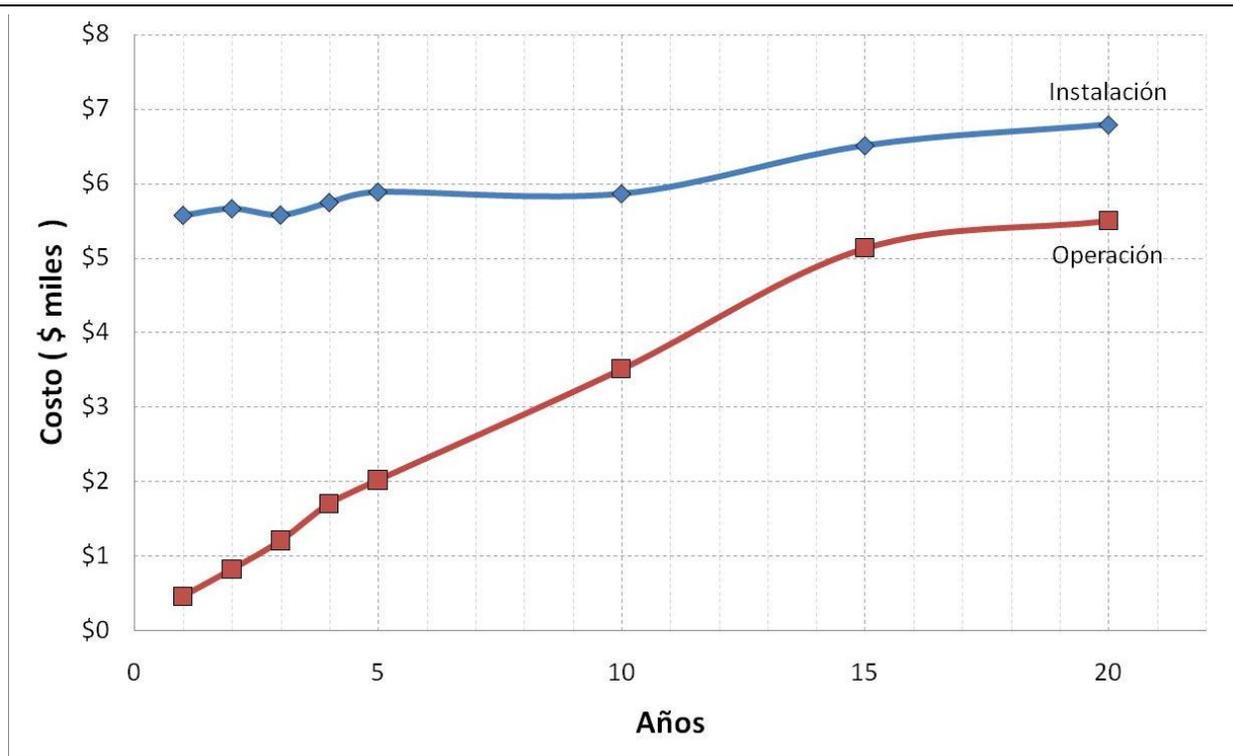


Ilustración 23 Proyección de costos hasta 20 años

La ilustración 24 muestra los costos unitarios totales optimizados hasta 20 años.

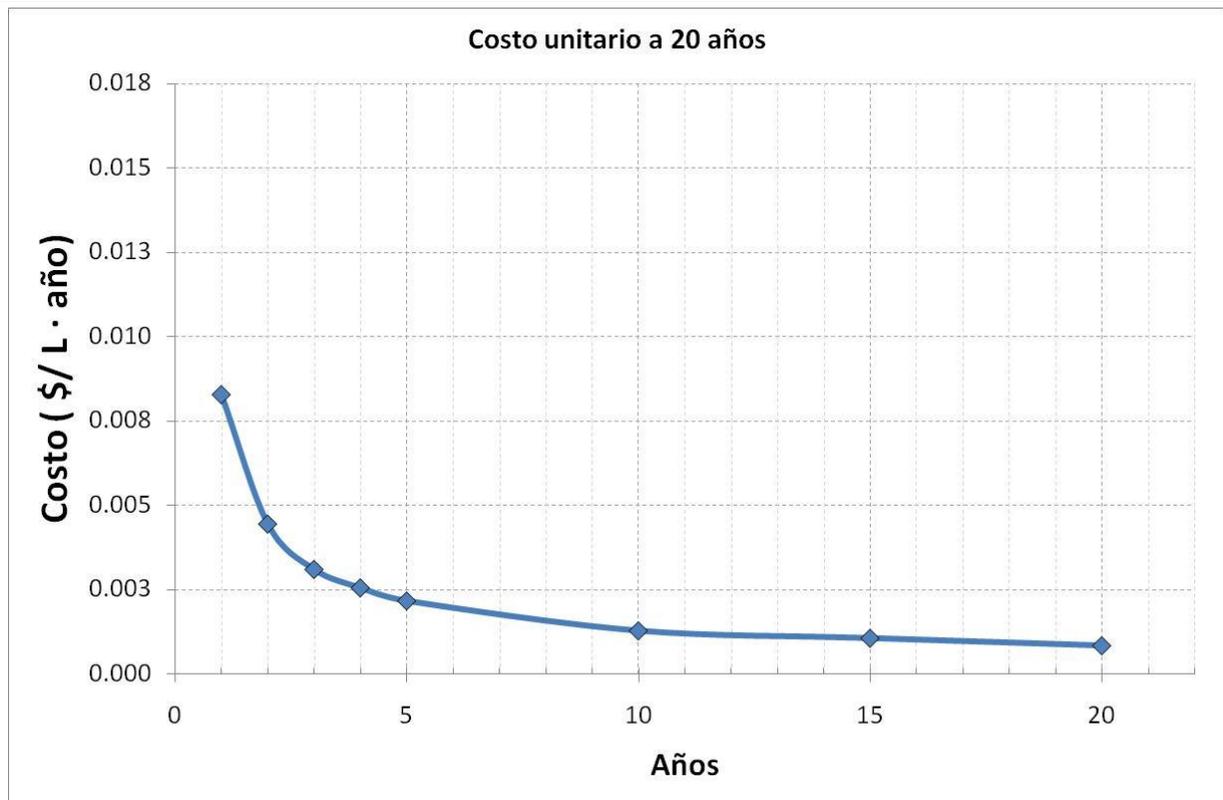


Ilustración 24 Proyección costo unitario a 20 años

Otros resultados

Áreas de intercambio termico

Se observó una relación inversa del área de intercambio térmico con el tiempo de calentamiento, el área disminuye al aumentar el tiempo de calentamiento, esta relación se observa en todos los escenarios optimizados.

Las ilustraciones 25, 26 y 27 muestran esta relación para 3 volúmenes a calentar. El total de graficas se muestra en la sección de apéndices.

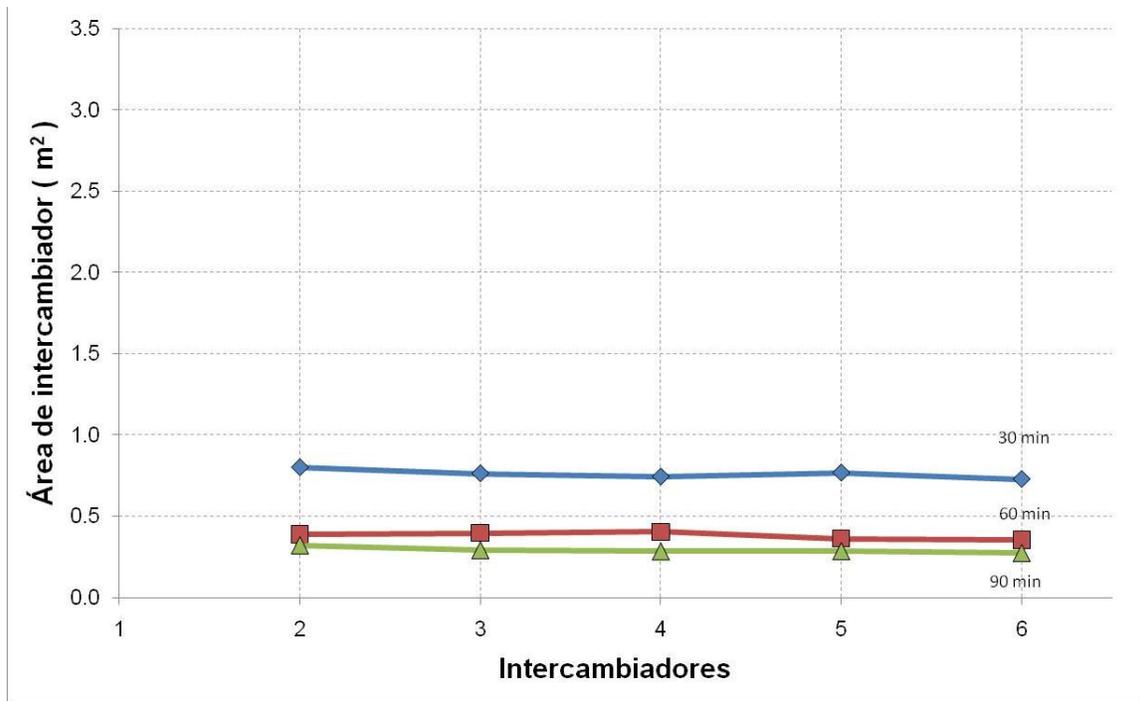


Ilustración 25 Área de intercambiador para 500 L

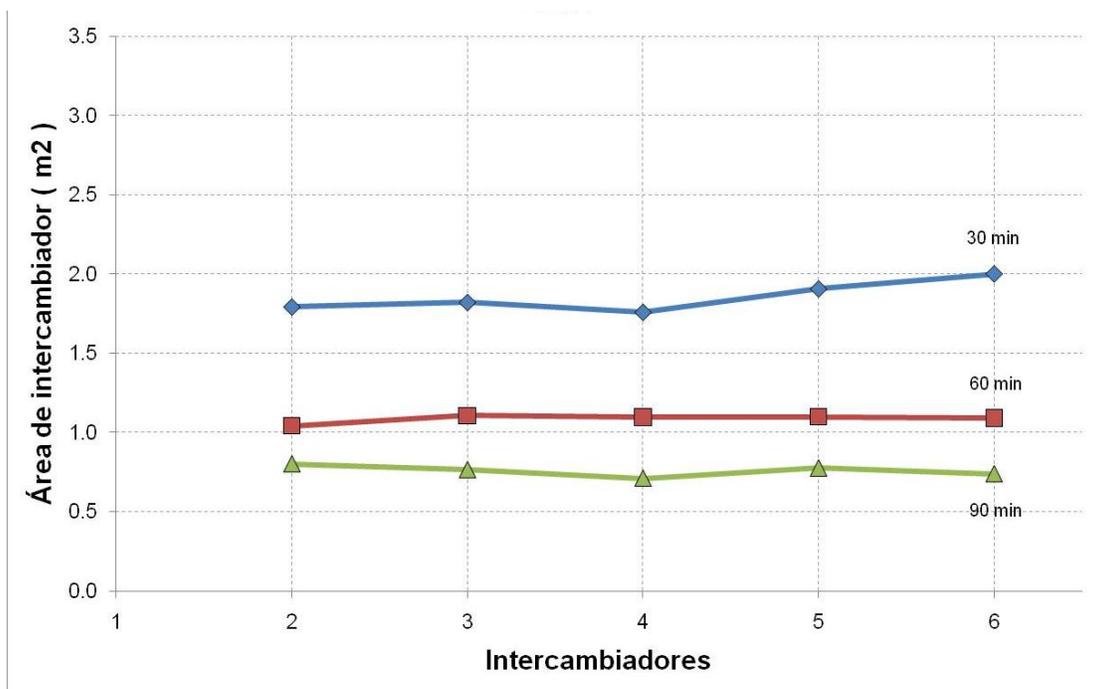


Ilustración 26 Área de intercambiador para 1500 L

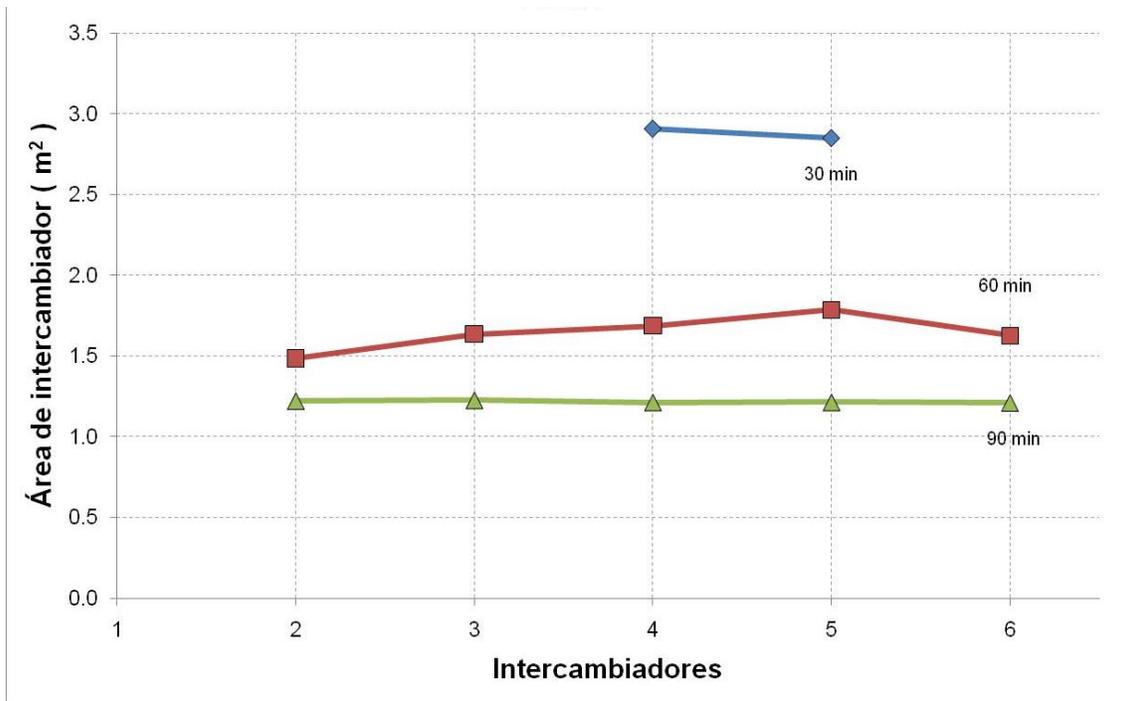


Ilustración 27 Área de intercambiador para 2500 L

Velocidad de flujo

Se observó tendencia a una relación inversa del tiempo de calentamiento con la velocidad de flujo, la velocidad disminuye al aumentar el tiempo de calentamiento.

Las ilustraciones 28, 29 y 30 muestran ésta relación para 3 volúmenes a calentar. El total de graficas se muestra en la sección de apéndices.

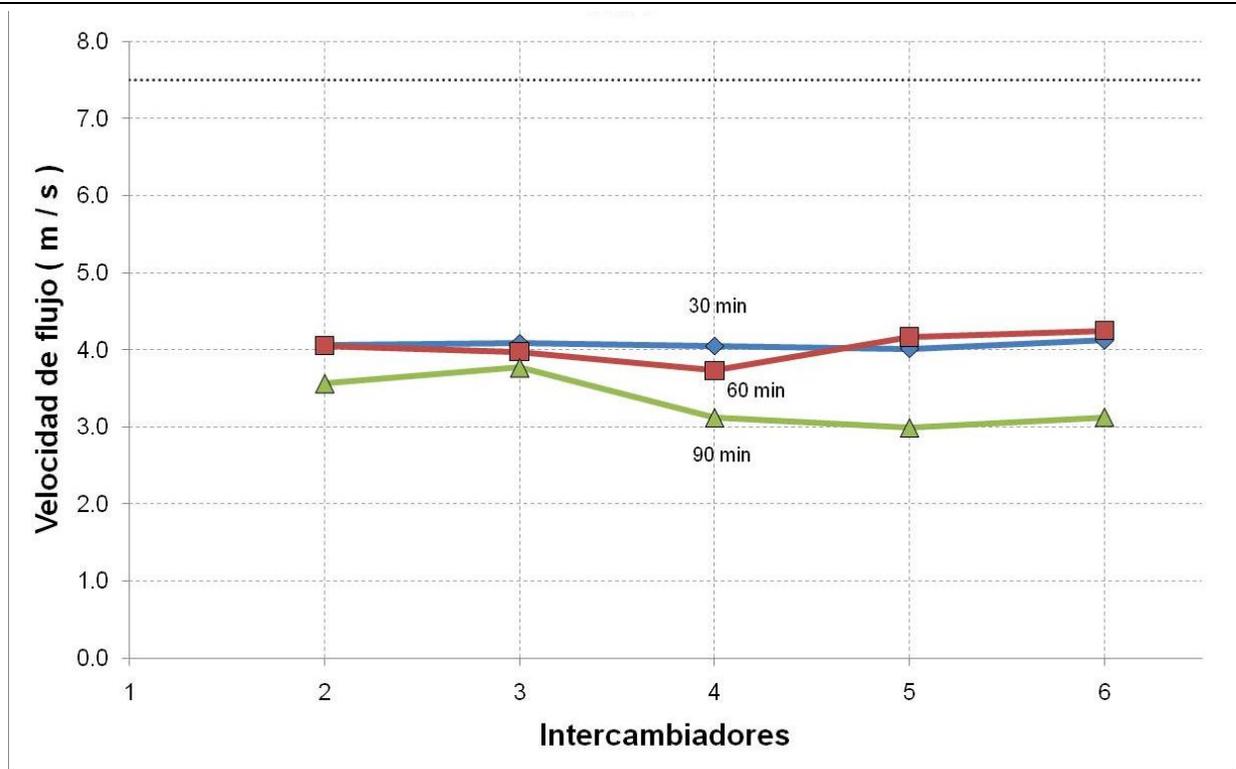


Ilustración 28 Velocidad de flujo para 500 L

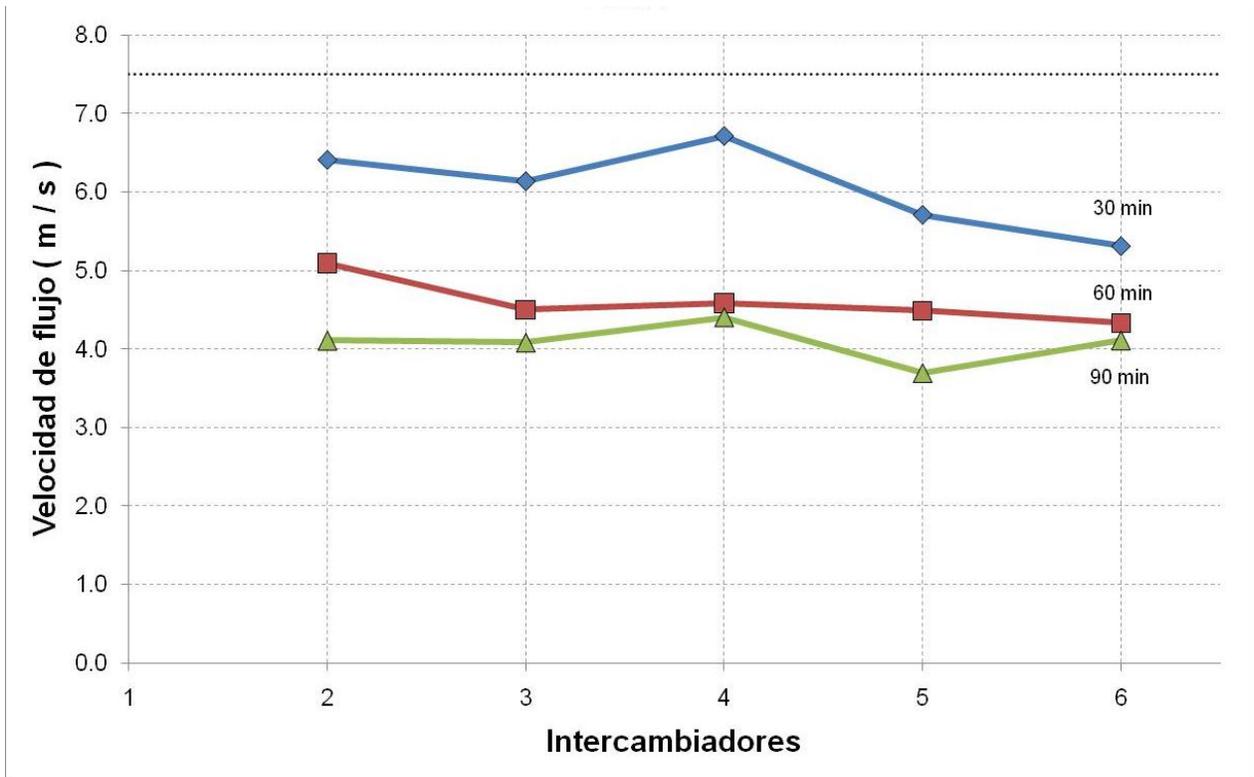


Ilustración 29 Velocidad de flujo para 1500 L

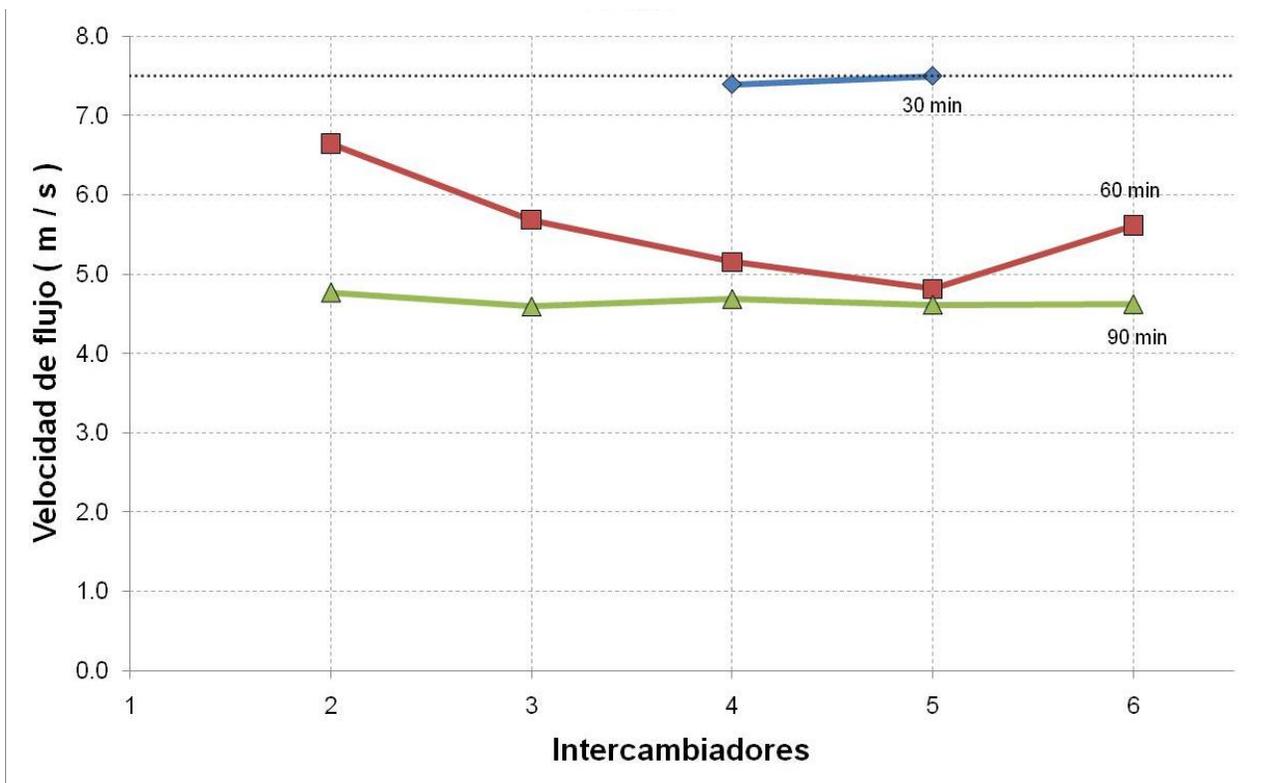


Ilustración 30 Velocidad de flujo para 2500 L

Relación de costos

Se observó que si enlistamos los costos de fabricación y operación para un volumen dado, por ejemplo 2000 L con todas sus combinaciones de tiempos y numero de intercambiadores de calor, en todos los puntos, los costos de fabricación siempre son mayores a 90% y los costos de operación siempre son menores a 10%.

Tabla 14 costo de fabricación y operación para 2000 L.						
Tiempo (min)	Nº Hx	Costo Inst. (\$)	%	Costo Oper.(\$)	%	Total (\$)
90	4	2670	91.82	238	8.18	2908
	5	2899	91.83	258	8.17	3157
	6	2924	91.72	264	8.28	3188
	2	3036	92.65	241	7.35	3277
	3	3325	92.21	281	7.79	3606
60	3	4344	94.56	250	5.44	4594
	5	4357	94.33	262	5.67	4619
	6	4394	94.31	265	5.69	4659
	4	4547	94.53	263	5.47	4810
	2	4725	93.92	306	6.08	5031
30	6	5573	92.34	462	7.66	6035
	5	5561	92.08	478	7.92	6039
	3	5572	91.80	498	8.20	6070
	4	5593	91.55	516	8.45	6109
	2	5963	93.27	429	6.73	6393

La ilustración 31 muestra la relación de costos de la tabla 13, se observó una proporción del orden de 9 a 1 entre los costos de fabricación y los costos de operación.

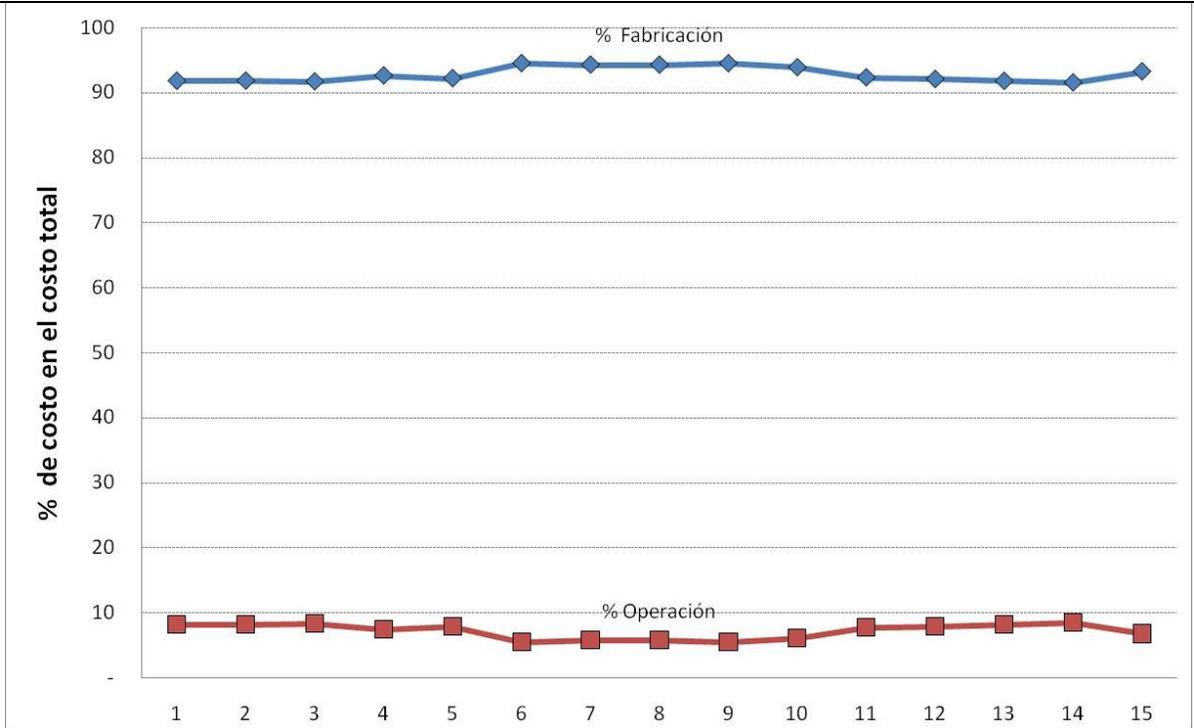


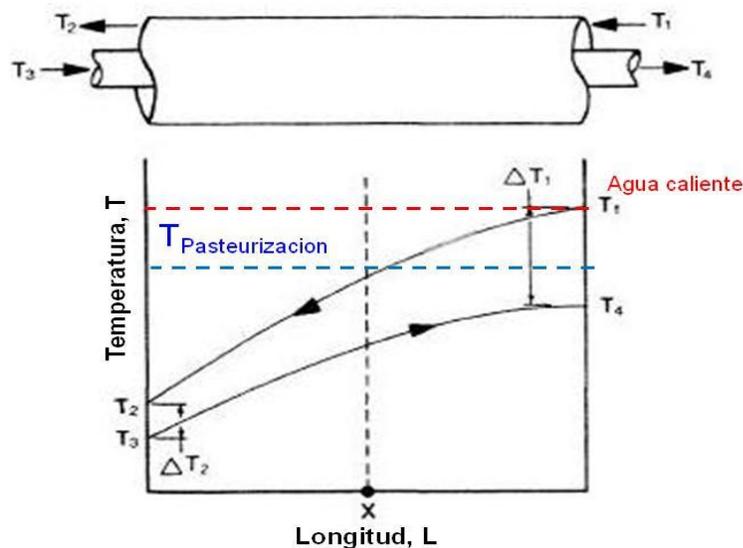
Ilustración 31 Relación porcentual costos de fabricación y operación

Discusión de resultados

No convergencias

En la sección de resultados se reportó que no hubo convergencias en 52 corridas, esto ocurrió en 3 condiciones básicas:

- Un solo intercambiador: Por definición, en un intercambiador de calor tipo tubo en tubo a contraflujo, la diferencia de temperaturas no es constante y tiende a disminuir junto con la efectividad al aumentar la longitud del mismo.



- T₁ = Entrada fluido caliente
- T₂ = Salida fluido caliente
- T₃ = Entrada fluido frío
- T₄ = Salida fluido frío

Ilustración 32 Diferencia de temperaturas en intercambiador de calor

Si a eso agregamos que solo tenemos una diferencia de 2 °C entre el fluido de calentamiento (65 °C) y la temperatura de pasteurización (63 °C), es muy difícil que el fluido a calentar, alcance la temperatura deseada.

- Volúmenes pequeños en tiempo largo: Cuando se hicieron estas corridas, el optimizador reportó conflictos con el límite inferior de diámetro. Es decir que por ser un volumen pequeño de leche, era necesario una cantidad de calor también

pequeña, para ello intentó disminuir lo más posible las velocidades de flujo y el área de transferencia, disminuyendo sus dimensiones, tanto los diámetros como la longitud, al no poder disminuir los diámetros debido a los límites, el optimizador se detuvo.

- c) Volúmenes grandes en tiempo corto: No fue posible para el programa de optimización, a partir de las condiciones límites (porque sería necesario un intercambiador demasiado robusto) poder proponer un intercambiador que pudiera lograr transferir el calor necesario en el tiempo definido.

Óptimos por número de intercambiadores de calor

De la suposición inicial de que siempre un mayor número de intercambiadores de calor sería la mejor opción y que no era posible obtener valores óptimos con un número de intercambiadores de calor menor, se observó que aun y cuando la combinación de seis intercambiadores de calor fue la que obtuvo un mayor número de valores mínimos optimizados con 13 resultados, que significan el 36.11%, los restantes 23 resultados, el 63.88 % correspondió a combinaciones de intercambiadores de calor menores a seis.

Impacto del factor tiempo de calentamiento en costos.

En esencia, el intercambiador debe transferir una determinada cantidad de energía a la leche para aumentar su temperatura, esta energía es la misma por unidad de volumen. La diferencia al variar el tiempo, es su capacidad de transferencia de calor. El optimizador debe aumentar el área de transferencia y la velocidad de flujo para aumentar dicha transferencia en tiempos de calentamiento cortos y por el contrario, puede disminuir el área de transferencia y la velocidad de flujos para tiempos mayores. Tanto el área de transferencia (costo de fabricación) como la velocidad de flujos (costo de operación) impactan directamente al costo total unitario. De ahí la importancia de tomar en cuenta las necesidades del usuario al fabricarlo; si se invierte una mayor cantidad de dinero en la construcción inicial para lograr tiempos de calentamiento más cortos, o bien fabricar un intercambiador más económico cuando el factor tiempo no es significativo en el trabajo diario.

Impacto del número de intercambiadores de calor en costos

No se encontró una relación entre el número de intercambiadores y los costos mínimos. La existencia de límites para los diámetros tanto para el tubo interior como para el tubo exterior, afecta la continuidad en el aumento de sus diámetros. Se observa que durante la optimización se generan condiciones específicas en dimensiones y velocidad de flujos que conducen a encontrar valores óptimos sin que necesariamente sea con 6 intercambiadores de calor.

Costos fabricación y Operación

El optimizador, calculó los parámetros de pre-diseño del intercambio térmico en función de la cantidad de la leche a calentar y el tiempo disponible entre otras variables, la ilustración 33 muestra las curvas del aumento de temperatura con relación al tiempo para un mismo volumen de leche.

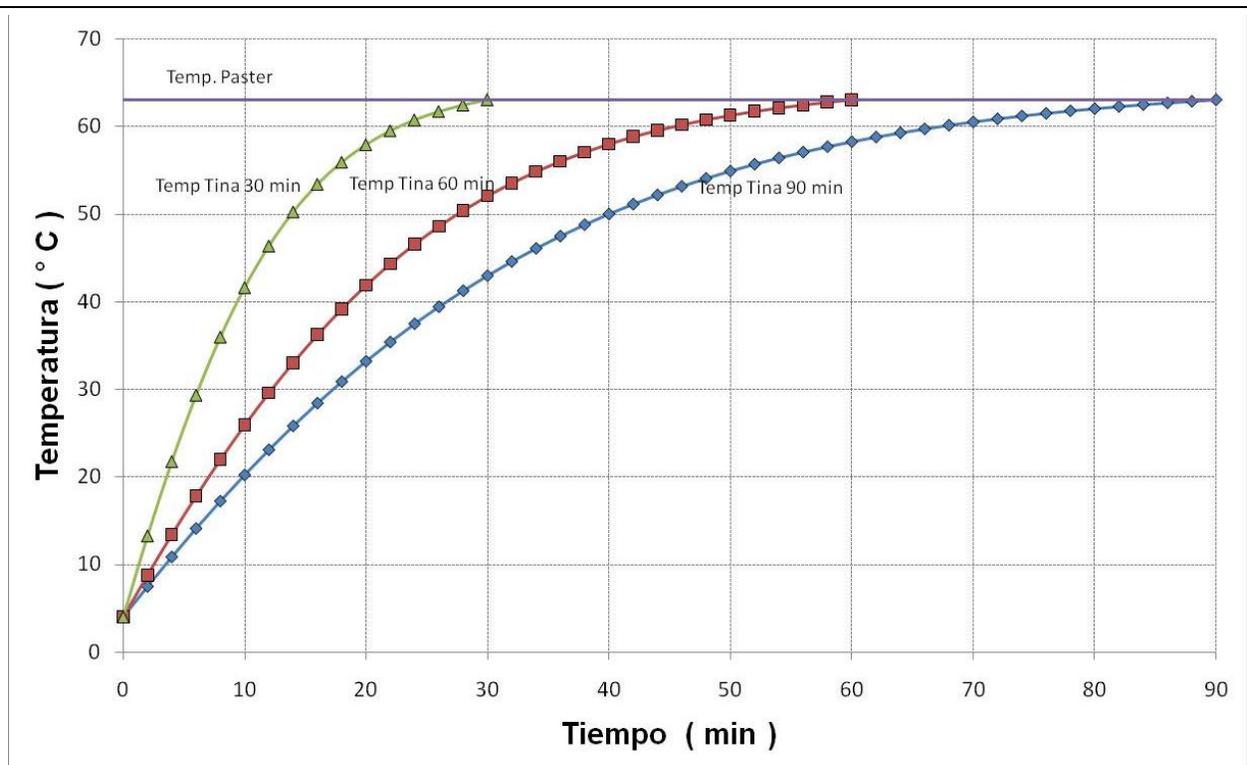


Ilustración 33 Calentamiento mismo volumen y número de intercambiadores de calor a 30, 60 y 90 min.

De acuerdo con el tiempo disponible para realizar el calentamiento, el optimizador pre-diseñó un sistema con una capacidad de transferir calor que está relacionada tanto con

el área de transferencia (costo de fabricación), como con los flujos (costo de operación). Por lo tanto para un menor tiempo de calentamiento, el costo total siempre será mayor.

Mecánica del Intercambio

Áreas

El área de transferencia de calor fue inversamente proporcional al tiempo de calentamiento.

La ilustración 34 muestra el área de transferencia de calor para los distintos tiempos de calentamiento.

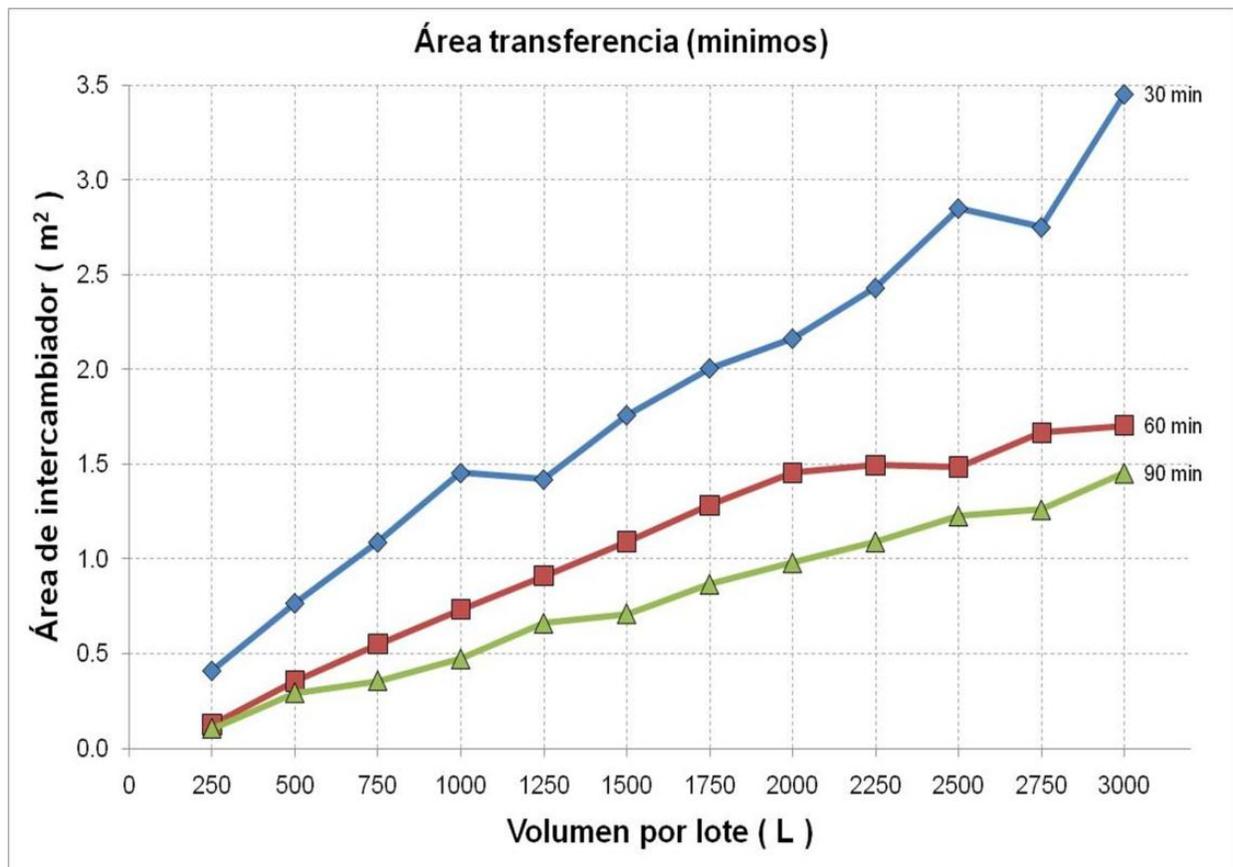


Ilustración 34 Áreas de transferencia

Velocidades

También en el aspecto de las velocidades, hubo relación inversa al tiempo de calentamiento.

La ilustración 34 muestra las velocidades para los mínimos de cada volumen de lote a calentar en los tres tiempos de calentamiento.

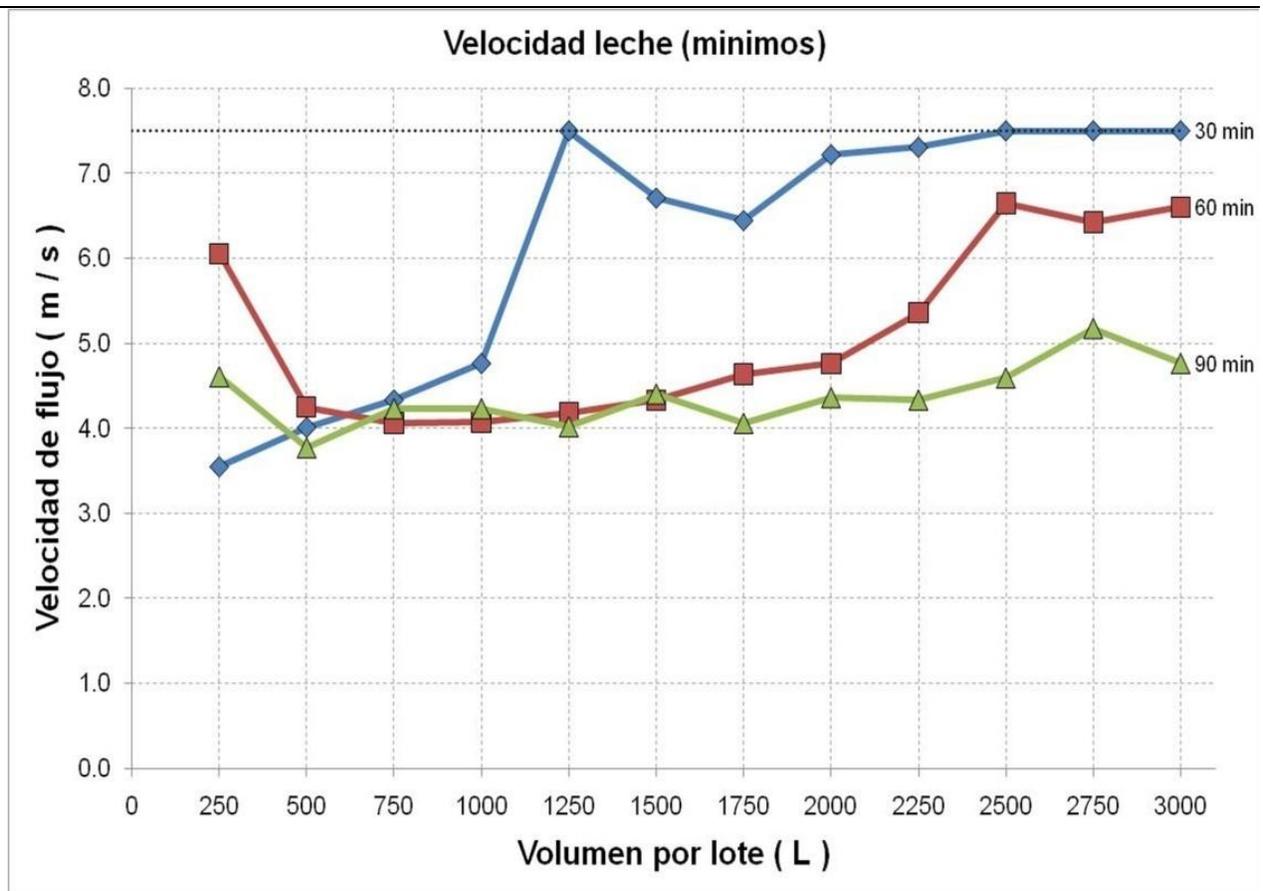


Ilustración 35 Velocidad de flujos

Es de señalarse que excepcionalmente, para 250 litros, el tiempo de calentamiento de 30 minutos manejó una velocidad más baja que los tiempos de 60 y 90 minutos. Es en este punto en donde se encontró el mínimo total unitario más bajo de todos.

Conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos

El uso de herramientas computacionales y en específico el desarrollo de modelos matemáticos, permite reproducir, con un cierto grado de precisión y exactitud, los sistemas que son sujeto de estudio, los sesgos en los resultados, pueden estar determinados por las simplificaciones que se asuman.

Las herramientas de cálculo como el EES permiten resolver un juego complejo de ecuaciones y obtener un valor optimizado, evitando con ello un largo proceso de cálculos sujetos a error humano.

Respecto al objetivo de este trabajo, se logró realizar la modelación del sistema de intercambio térmico. También fue posible, para los distintos escenarios simulados, obtener los parámetros de diseño básico que sirven como referencia para la fabricación de un prototipo.

Esta herramienta de cálculo puede llegar a ser de utilidad para su aplicación práctica entre los fabricantes de productos lácteos, pero también para todo aquel que desee fabricar un sistema de calentamiento líquido-líquido a bajo costo.

Como complemento de este sistema modelado, se puede modelar las pérdidas de calor al medio circundante, la estratificación térmica en el depósito de leche, las pérdidas por fricción en los cambios de dirección y conexiones diversas.

Como este es un sistema de pasteurizado, como complemento, se puede modelar el mismo sistema de intercambiadores de calor, pero en el proceso de enfriamiento, que es igualmente necesario para complementar ésta operación.

Bibliografía

- Badui, D.S. Química de los Alimentos. Alhambra Mexicana 1981
- Çengel, Y.A. Termodinámica. McGraw-Hill. 2003
- Çengel, Y.A. Transferencia de Calor. McGraw-Hill. 2004
- Fernandez, M
Montes, F. Influence of temperature and composition on some physical properties of milk and milk concentrate. Journal of Dairy Research. Cambridge. 1972
- Kessler, H.G. Food Engineering and Dairy Technology. V.A.K, 1981
- Kern, D.Q.
Kraus, A.D. Extended Surface Heat Transfer. McGraw-Hill. 1972
- Martin Domínguez, I.R. Fenómenos de Transporte. Apuntes de Curso. 2004
- SAGARPA Boletín de Leche. 2008
- Shah, R, K.
Sekulic, D.P. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Wiley. 2003
- Smith, E.M. Thermal Design of Heat Exchangers. Wiley. 1977
- Streeter, V.L.
Wylie, E.B.
Bedford, K.W. Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill. 2000
- Normas:
2002, Productos y servicios. Leche, fórmula láctea y producto lácteo combinado. Especificaciones sanitarias, NOM-184-SSA1-2002, Mexico. 6.8.1.1, 6.8.1.2, 6.8.2.1
21 C.F.R. 1240.61 Mandatory pasteurization for all milk and milk products in final package form intended for direct human consumption. FDA. USA

Apéndice

Modelado de variables

Viscosidad leche

Kessler, H.G. 1981, publicó gráficos experimentales sobre los cambios de la viscosidad de la leche con respecto a la temperatura, de la interpretación del mismo se obtuvo la función polinómica:

$$\text{Viscosidad Leche} = A + B * \text{Temp} + C * \text{Temp}^2$$

$$A = 0.00320429$$

$$B = -0.0000643095$$

$$C = 0.000000416667$$

Ecuación 25 Función viscosidad leche

Viscosidad agua:

EES dispone de ésta propiedad en su base de datos, al optimizar se presentaron errores, por lo que se decidió graficar esta función a varias temperaturas.

$$\text{Viscosidad Agua} = A + B * \text{Temp} + C * \text{Temp}^2 + D * \text{Temp}^3 + E * \text{Temp}^4$$

$$A = 0.00178206$$

$$B = -0.000057808$$

$$C = 0.00000118333$$

$$D = -1.36687E - 08$$

$$E = 6.5082E - 11$$

Ecuación 26 Función viscosidad agua

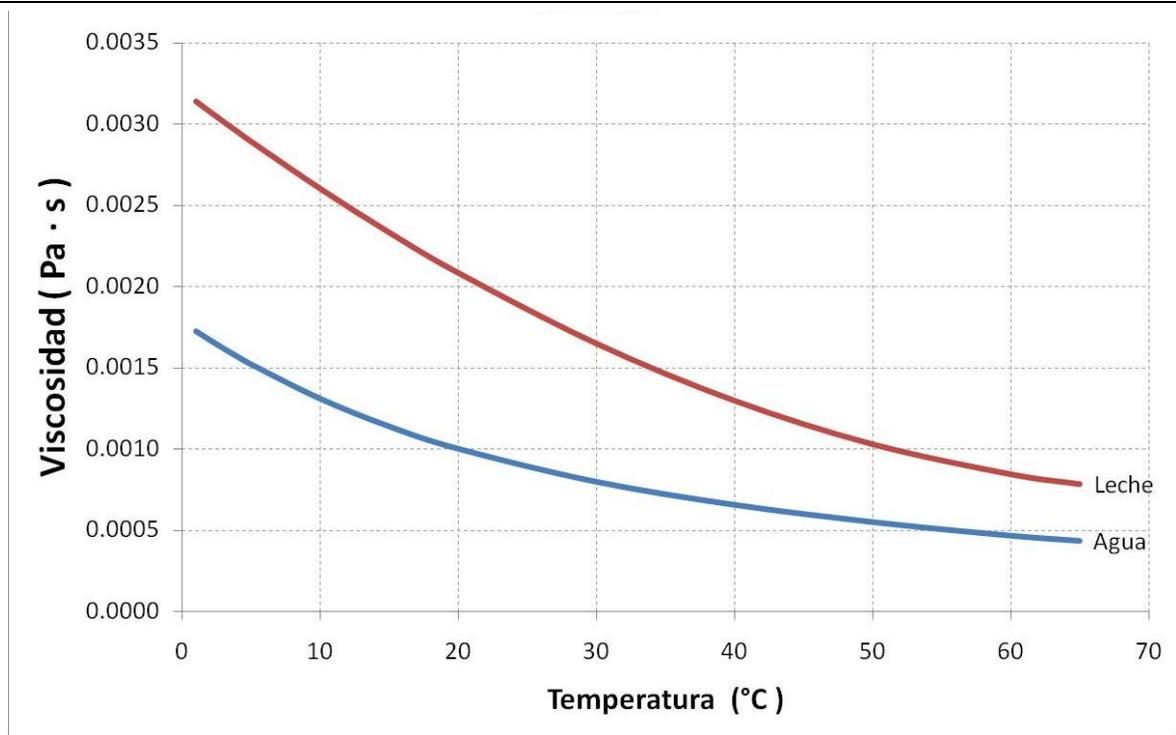


Ilustración 36 Función viscosidad

Conductividad térmica leche

Fernández-Martin y Montes (1972), publicaron gráficos experimentales sobre los cambios de la conductividad térmica de la leche con respecto a la temperatura.

$$\text{Conductividad Leche} = A + B * \text{Temp} + C * \text{Temp}^2$$

$$A = 0.51708411$$

$$B = 0.00164856$$

$$C = -0.00000534$$

Ecuación 27 Función conductividad leche

Conductividad térmica agua

EES dispone de ésta propiedad en su base de datos, Al optimizar se presentaron errores, por lo que se decidió graficar esta función a varias temperaturas.

$$\text{Conductividad Agua} = A + B * \text{Temp} + C * \text{Temp}^2$$

$$A = 0.5468538$$

$$B = 0.00217334$$

$$C = -0.0000100708$$

Ecuación 28 Función conductividad agua

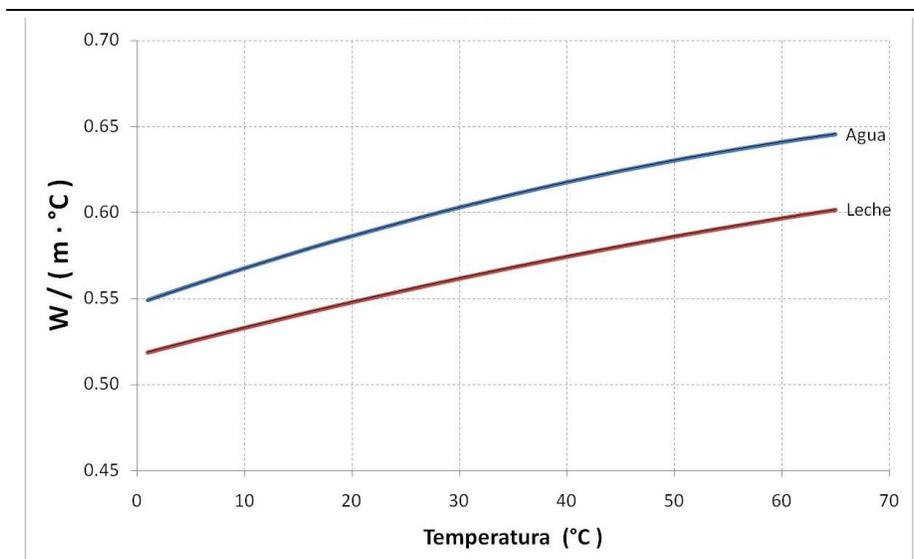


Ilustración 37 Función conductividad

Nº de Prandtl:

A partir de la ecuación que lo define, se obtuvo el número de Prandtl.

Nº Prandtl de leche: los valores de viscosidad, Cp y conductividad corresponden a la temperatura de cada intercambiador.

$$Pr_M = \frac{\mu_M C_{pM}}{k_M}$$

Ecuación 29 Nº Prandtl leche

Nº Prandtl de agua: En función de la temperatura.

$$\text{Prandtl Agua} = A + B * \text{Temp} + C * \text{Temp}^2 + D * \text{Temp}^3 + E * \text{Temp}^4$$

$$A = 13.712$$

$$B = -0.501003$$

$$C = 0.0109784$$

$$D = -0.000132001$$

$$E = 6.45098E - 07$$

Ecuación 30 Nº Prandtl agua

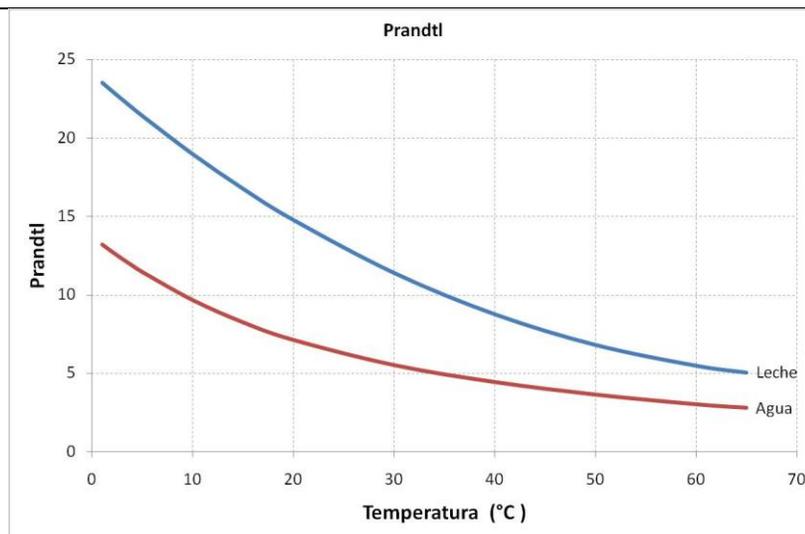


Ilustración 38 Nº de Prandtl

Cp de leche:

En la bibliografía revisada, no se encontraron correlaciones respecto al Cp de la leche con respecto a la temperatura, por lo que se adoptó un valor constante de 3890 J/kg°C.

Cp del agua:

EES dispone de ésta propiedad en su base de datos, Al optimizar se presentaron errores, por lo que se decidió graficar esta función a varias temperaturas.

$$Cp_{\text{Agua}} = A + B \cdot \text{Temp} + C \cdot \text{Temp}^2 + D \cdot \text{Temp}^3 + E \cdot \text{Temp}^4 + F \cdot \text{Temp}^5$$

$$A = 4225.63$$

$$B = -6.79789$$

$$C = 0.399417$$

$$D = -0.0108243$$

$$E = 0.000135684$$

$$F = -6.34272E - 07$$

Ecuación 31 Función Cp del agua

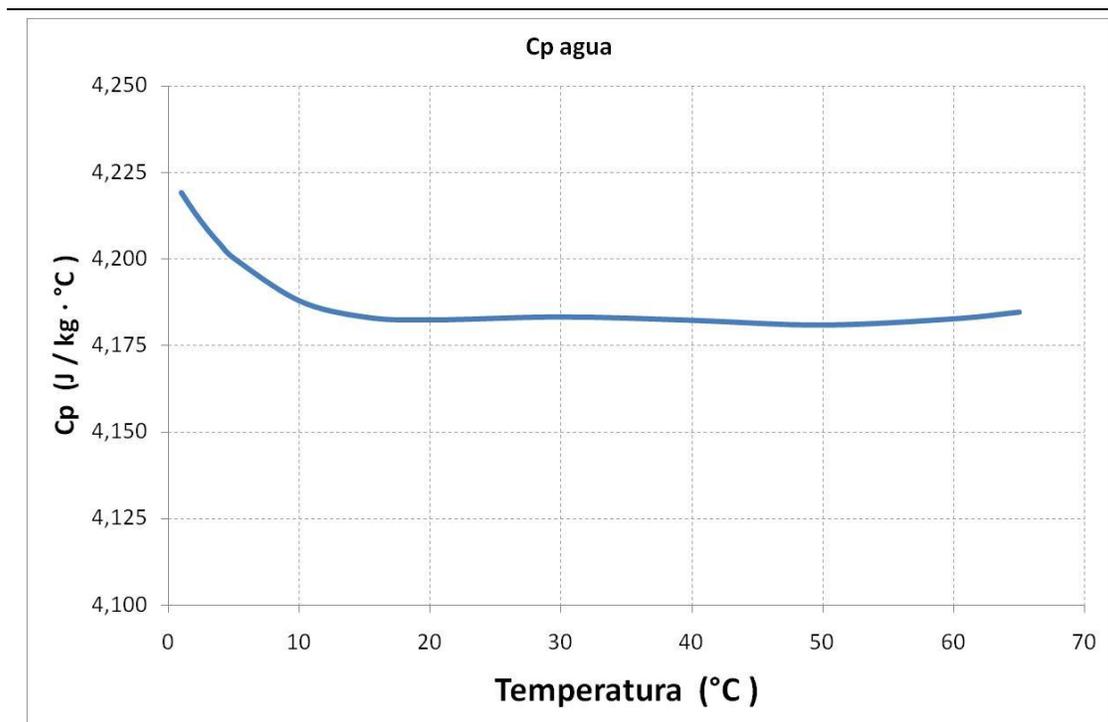


Ilustración 39 Función Cp del agua

Densidad de leche

En la bibliografía revisada, no se encontraron correlaciones respecto a la densidad de la leche, por lo que se adoptó un valor constante de 1.040 Kg/L.

Densidad del agua

EES dispone de ésta propiedad en su base de datos, Al optimizar se presentaron errores, por lo que se decidió graficar esta función a varias temperaturas.

$$\text{Densidad Agua} = A + B * \text{Temp} + C * \text{Temp}^2 + D * \text{Temp}^3$$

$$A = 999.97$$

$$B = 0.0380389$$

$$C = -0.00675322$$

$$D = 0.0000242166$$

Ecuación 32 Función densidad del agua

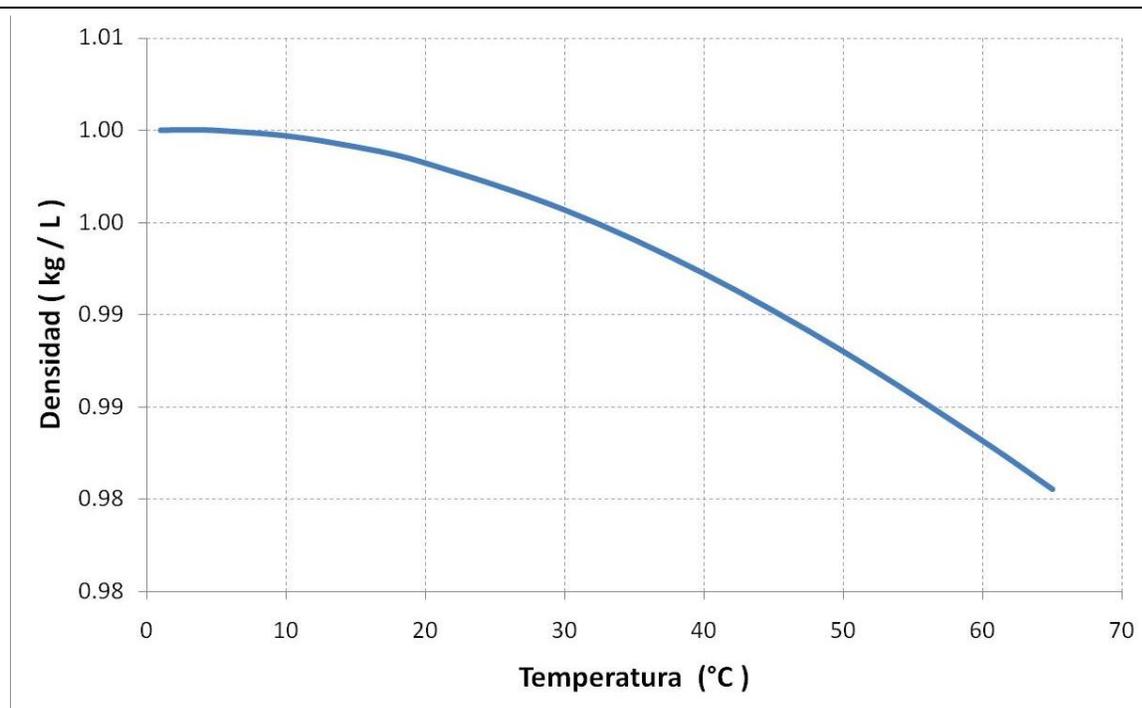


Ilustración 40 Función densidad del agua

Calculo de potencia de bomba

El sistema de recirculación para el calentamiento consta de una bomba para el desplazamiento de los fluidos y conducto del intercambiador, el cual al no tener paredes completamente lisas, ofrece resistencia al flujo, provocando pérdidas por fricción. La velocidad a la entrada y la salida son iguales y no se considera diferencia de alturas significativas. La ilustración 38 muestra el volumen de control para el cálculo de la potencia de la bomba, este diagrama se aplica tanto para el fluido frío como caliente.

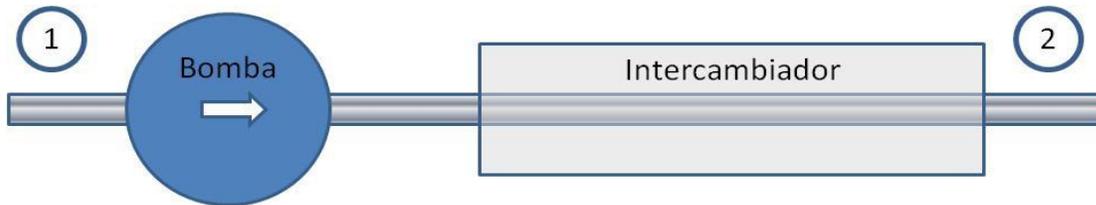


Ilustración 41 Volumen de control para calculo de potencia de bomba

A partir de la ecuación de la energía, descartamos las presiones iniciales y finales por ser atmosféricas, la velocidad inicial y final por ser el mismo diámetro y flujo másico y la diferencia de alturas por no ser significativa.

$$\frac{P_1}{\cancel{\gamma}} + \frac{V_1^2}{\cancel{2g}} + z_1 + \frac{w}{g} = \frac{P_2}{\cancel{\gamma}} + \frac{V_2^2}{\cancel{2g}} + z_2 + h_f$$

Ecuación 33 Ecuación de la energía

Donde obtuvimos:

$$w = g h_f \quad w = \frac{\dot{W}}{\dot{m}} \quad \dot{W} = \dot{m} g h_f$$

Factorizamos y reacomodamos:

$$\dot{W} = \rho v A g h_f$$

$$\dot{W} = \gamma \dot{V} h_f$$

Ecuación 34 Ecuación de la bomba

El motor de la bomba realiza un trabajo en el eje para que aumente la presión del fluido a la entrada del intercambiador, y que ésta compense las pérdidas por fricción hasta descargar a presión relativa de cero o atmosférica, a velocidad constante.

Código en EES de modelo

{Funciones de correlación de propiedades de Leche}

```
Function ViscosidadLeche(Temp)
if Temp<1 then
ViscosidadLeche = 0.0032
goto 10
endif
if Temp > 65 then
ViscosidadLeche = 0.00078
goto 10
endif
if (Temp >=1) and (Temp <= 65) then
AA = 0.00320429
BB = -0.0000643095
CC = 0.000000416667
ViscosidadLeche = AA + BB * Temp+ CC * Temp^2
goto 10
endif
10:
end
```

```
Function ConductividadLeche(Temp)
if Temp < 1 then
ConductividadLeche = 0.518727335
goto 12
endif
if Temp > 70 then
ConductividadLeche = 0.606338037
goto 12
endif
if (Temp >= 1) and (Temp <= 70) then
AA = 0.51708411
BB = 0.00164856
CC = -0.00000534
ConductividadLeche = AA + BB * Temp + CC * Temp^2
goto 12
endif
12:
end
```

{Funciones de correlación de propiedades de Agua}

```
Function CpAgua( Temp)
if Temp < 1 then
CpAgua = 4221
goto 13
endif
if Temp > 70 then
CpAgua = 4187
goto 13
endif
if (Temp >= 1) and (Temp <= 70) then
AA = 4225.63
BB = -6.79789
CC = 0.399417
DD = -0.0108243
EE = 0.000135684
```

```

FF = -6.34272E-07
CpAgua = AA + BB * Temp + CC * Temp^2 + DD * Temp^3 + EE * Temp^4 + FF * Temp^5
goto 13
endif
13:
end

```

```

Function DensidadAgua(Temp)
if Temp < 1 then
DensidadAgua = 1000
goto 14
endif
if Temp >70 then
DensidadAgua = 977.8
goto 14
endif
if (Temp >= 1) and (Temp <= 70) then
AA = 999.97
BB = 0.0380389
CC = -0.00675322
DD = 0.0000242166
DensidadAgua = AA + BB * Temp +CC * Temp^2 + DD * Temp^3
goto 14
endif
14:
end

```

```

Function ConductividadAgua(Temp)
if Temp < 1 then
ConductividadAgua = 0.5496
goto 15
endif
if Temp >70 then
ConductividadAgua = 0.6495
goto 15
endif
if (Temp >= 1) and (Temp <= 70) then
AA = 0.5468538
BB = 0.00217334
CC = -0.0000100708
ConductividadAgua = AA + BB * Temp + CC * Temp^2
goto 15
endif
15:
end

```

```

Function ViscosidadAgua(Temp)
if Temp < 1 then
ViscosidadAgua = 0.001732
goto 16
endif
if Temp >70 then
ViscosidadAgua = 0.000404
goto 16
endif
if (Temp >= 1) and (Temp <= 70) then
AA = 0.00178206

```

```

BB = -0.000057808
CC = 0.00000118333
DD = -1.36687E-08
EE = 6.5082E-11
ViscosidadAgua = AA + BB * Temp + CC * Temp^2 + DD * Temp^3 + EE * Temp^4
goto 16
endif
16:
end

```

```

Function PrandtlAgua(Temp )
if Temp<1 then
PrandtlAgua = 13.3
goto 17
endif
if Temp > 70 then
PrandtlAgua = 2.605
goto 17
endif
if (Temp >= 1) and (Temp <= 70) then
AA = 13.712
BB = -0.501003
CC = 0.0109784
DD = -0.000132001
EE = 6.45098E-07
PrandtlAgua = AA + BB * Temp + CC * Temp^2 + DD * Temp^3 + EE * Temp^4
goto 17
endif
17:
end

```

{Funcion de Costo de Tuberia}

```

Function Costo.SS(Diam)
AA = -123.91
BB = 295.52
CC = -103.3
DD = 15.677
Costo.SS = AA + BB * Diam + CC * Diam^2 + DD * Diam^3
end

```

```

Function Promedio(n, A[1..6])
Suma = 0
i = 1
repeat
Suma = Suma + A[i]
i = i + 1
until (i = n)
Promedio = Suma / n
end

```

{Datos De Entrada}

{Datos Generales}

```

Tarifa.Elec = 0.7215 [$/kW·h]
RR = 0.000045
NumHX =6[-]
PeriodoRec = 1

```

```

{Número de Intercambiadores}
{años}

```

Tiempo_min = 60[**min**]
Esp.SS = 0.001651 [**m**]

{**Tiempo del Calentamiento**}
{**Espesor pared tubo Interior**}

{**Datos de leche**}

Temp.Paster = 63
Temp.M.ini = 4.0 [**C**]
Vol.M_L =3000 {**Volumen de Leche**}
Vol.M=Vol.M_L*convert(**l,m^3**)

{ **Temperatura Inicial de la Leche en el Tanque**}

{**Datos de agua**}

Temp.W = 65 [**C**]

\$ifnot MINMAX

Long.HX_Tot = 6.781 [**m**]
Diam.SS_in = 3.412 [**in**]
Diam.Cu_in = 4.136 [**in**]
Vel.M =6.12
Vel.W = 4.625
\$endif

{ **Longitud del intercambiador** }
{ **Diamtero Interior Inoxidable** }
{ **Diamtero Interior Cobre** }

{ **Conversión de Unidades** }

Diam.SS = Diam.SS_in *convert(**in, m**)
Diam.Cu = Diam.Cu_in * convert(**in, m**)
Tiempo_s = Tiempo_min * convert(**min, s**)
Tiempo_h = Tiempo_min * convert(**min, h**)

{**Propiedades Fijas del Fluido de Calentamiento: Agua**}

Cp.W = CpAgua(Temp.W) {**Cp** }
Rho_W = DensidadAgua(Temp.W)
kappa_W = ConductividadAgua(Temp.W) { **Conductividad** }
Mu_W = ViscosidadAgua(Temp.W) { **Viscosidad** }
Pr.W = PrandtlAgua(Temp.W) { **Prandtl** }

{**Propiedades Fijas del Flujo de Calentamiento: Agua**}

Re.W * Mu_W = (Rho_W * Vel.W * DiamHid.W) { **Reynolds** }
Nu.W = 0.023 * Re.W^0.8 * Pr.W^0.3 {**Nusselt**}
h.W * DiamHid.W = kappa_W * Nu.W {**h del agua**}

{**Propiedades Fijas del fluido calentado: Leche**}

Cp.M = 3890

Long.HX_Tot = NumHX * Long.HX

{**Tubo Interior, fluye leche**}

Area.SS = (pi / 4) * Diam.SS^2
Area.HX = pi * Diam.SS * Long.HX { **Área de Transferencia de Calor .}**
Area.SS_E = (pi / 4) * (Diam.SS + 2 * Esp.SS)^2 { **Área transversal del tubo Interior** }

{Tubo Exterior, fluye Agua}

Area.Cu = (pi / 4) * Diam.Cu^2 - Area.SS_E
DiamHid.W = Diam.Cu - (Diam.SS + 2 * Esp.SS)

{ Área seccional anular del tubo exterior,(m^2)}
{ Diámetro Hidráulico}

{Gasto Volumétrico y Flujo Másico: Leche}

Rho_M = 1040.0
V_dot_M = Vel.M * Area.SS
m_dot_M = Rho_M * V_dot_M
MasaM = Rho_M * Vol.M

{ Flujo Volumétrico}
{Masa de leche en tina}

{Gasto Volumetrico y Flujo Másico: Agua}

V_dot_W = Vel.W * Area.Cu
m_dot_W = Rho_W * V_dot_W
V_dot_W_Tot = V_dot_W * NumHX

{ Flujo Volumétrico por intercambiador}
{ Flujo Másico}
{Flujo Volumétrico Total}

{Capacidades caloríficas y Relación de capacidades}

CapCal.W = m_dot_W * Cp.W
CapCal.M = m_dot_M * Cp.M
CapCal.min = min(CapCal.W, CapCal.M)

{ Capacidad Calorífica Leche}
{ Capacidad Calorífica Mínima}

Duplicate i = 1, NumHX

kappa_M[i] = ConductividadLeche(Temp.M[i-1])
Mu_M[i] = ViscosidadLeche(Temp.M[i-1])
Pr.M[i] = Mu_M[i] * Cp.M / kappa_M[i]
Re.M[i] = Rho_M * Vel.M * Diam.SS / Mu_M[i]
Nu.M[i] = 0.023 * (Re.M[i])^0.8 * (Pr.M[i])^0.3
h.M[i] = kappa_M[i] * Nu.M[i] / Diam.SS

{Viscosidad
{Prandtl }
{Reynolds }
{Nusselt }
{Coef. Transferencia de calor (W/m^2-K) }

1/U[i] = 1/h.W + 1/h.M[i]

Q_dot_max[i] = CapCal.min * (Temp.W - Temp.M[i-1])
Q_dot_real[i] = CapCal.M * (Temp.M[i] - Temp.M[i-1])
Q_dot_real[i] = epsilon[i] * Q_dot_max[i]

{ Transferencia de calor real}
{ Efectividad del Intercambiador}

NTU[i] = U[i] * Area.HX / CapCal.min
epsilon[i] = HX('counterflow', NTU[i], CapCal.W, CapCal.M, 'epsilon')

FF.M[i] = MoodyChart(Re.M[i], RR)
end

{Hacemos ceros todos los datos basura para iniciar calculo}

Duplicate i = (NumHX + 1), 6
Temp.M[i] = 0
FF.M[i] = 0
end

{Cambio de Temperatura en el tiempo}

DerivTemp.M * MasaM = m_dot_M * (Temp.M[NumHX] - Temp.M[0])
Temp.M[0] = Temp.M.ini + integral(DerivTemp.M, t, 0, Tiempo_s)
T.min = t / 60

FF.W = MoodyChart(Re.W, RR)

FF.M_avg = Promedio(NumHX, FF.M[1..NumHX])

{Calculo de perdidas}

Perdida.M = FF.M_avg * (Long.HX_Tot / Diam.SS) * (Vel.M^2 / (2 * g#))

Perdida.W = FF.W * (Long.HX / DiamHid.W) * (Vel.W^2 / (2 * g#))

{Calculo de Potencias}

Pot.M = V_dot_M * Rho_M * g# * Perdida.M

Pot.W = V_dot_W_Tot * Rho_W * g# * Perdida.W

Pot.Tot = Pot.M + Pot.W

Pot.Tot_kW = Pot.Tot * convert(W, kW)

{Costos}

Costo.Inst = (Costo.SS(Diam.Cu_in) + Costo.SS(Diam.SS_in)) * Long.HX_Tot

Costo.Oper * 0.8 = (Pot.Tot_kW * Tarifa.Elec * Tiempo_h * 365 * PeriodoRec)

Costo.Penal = abs(Temp.Paster - Temp.M[0]) * 10000

Costo.Tot = Costo.Inst + Costo.Oper

Costo.Optim = Costo.Tot + Costo.Penal

{Costo unitario}

Vol.M.Tot = Vol.M_L * 365 * PeriodoRec

Costo.Unit = Costo.Tot / Vol.M.Tot

\$Warnings On

{Tabla de resultados de integración}

\$integraltable t:120, T.min, Temp.M[0], Temp.M[1], Temp.M[2], Temp.M[3], Temp.M[4], Temp.M[5],
Temp.M[6], Temp.Paster

Costos de tubería comercial

La empresa COMERCIALIZADORA DE INOXIDABLES HERNANDEZ S.A. DE C.V. cotizó el costo unitario del tubo de acero inoxidable tipo 304 en calibre 16 como sigue:

Tabla 15 Costo unitario de tuberías comerciales	
Diámetro Nominal (in)	Costo unitario (m)
1	\$112.00
1 ½	\$152.00
2	\$196.00
2 ½	\$252.00
3	\$284.04
4	\$500.00

Estos valores se ajustaron a una función polinómica de grado 3 resultando:

$$AA = -123.91 \quad BB = 295.52 \quad CC = -103.3 \quad DD = 15.677$$

$$\text{Costo tubo} = AA + BB \text{ Diam} + CC \text{ Diam}^2 + DD \text{ Diam}^3$$

Ecuación 35 Función costo tubo

Resultados completos

Tabla 16 Resultados completos

Numero Hx.	Tiempo (min)	Volumen leche (L)	Costo Inst. (\$)	Costo Oper. (\$)	Costo Tot. (\$)	Penal (\$)	Costo Unit (\$/L-año)	Diam Ext.(in)	Diam Int.(in)	Long HX (m)	Long. Tot. (m)	Vel M (m/s)	Vel W (m/s)
2	30	250	1262	29.63	1291	58.19	0.01415	1.676	0.8527	2.898	5.795	4.062	3.898
3	30	250	1438	34.58	1473	42.16	0.01614	2.006	0.8421	1.99	5.971	3.974	3.987
4	30	250	1211	33.84	1245	122.2	0.01364	1.449	0.8459	1.538	6.154	3.547	4.044
5	30	250	1299	33.14	1332	12.36	0.0146	1.776	0.8228	1.175	5.877	4.144	3.896
2	60	250	466.9	24.19	491.1	16.71	0.005382	1.144	0.9333	1.318	2.637	4.242	3.297
3	60	250	362.5	28.86	391.4	19	0.004289	1.13	0.9016	0.7074	2.122	4.871	3.775
4	60	250	289.4	35.24	324.7	10.75	0.003558	1.042	0.8012	0.5018	2.007	6.052	4.001
5	60	250	340	29.65	369.7	3.089	0.004051	1.126	0.8988	0.4003	2.001	4.983	3.79
6	60	250	319.2	29.36	348.6	1.577	0.00382	1.113	0.8578	0.328	1.968	5.707	3.542
2	90	250	241.2	21.94	263.1	172.2	0.002884	1.057	0.7996	0.8267	1.653	4.605	3.46
2	30	500	2049	57.79	2107	50.02	0.01155	2.087	1.693	2.998	5.995	4.059	3.999
3	30	500	1982	59.98	2042	29.59	0.01119	1.981	1.591	2.027	6.082	4.084	4.037
4	30	500	1967	63.14	2030	1.71	0.01112	1.98	1.54	1.53	6.119	4.048	4.17
5	30	500	1927	66.95	1994	318.1	0.01093	1.878	1.622	1.2	6.001	4.011	4
2	60	500	1241	60.78	1301	76	0.00713	1.642	0.8519	2.888	5.776	4.052	3.954
3	60	500	1438	69.14	1507	39.76	0.008259	2.006	0.8423	1.99	5.97	3.973	3.987
4	60	500	1427	75.95	1503	6.41	0.008237	1.926	0.8477	1.512	6.047	3.729	4.16
5	60	500	978.9	56.47	1035	820.9	0.005673	1.287	0.8449	1.086	5.43	4.164	3.726

6	60	500	927.1	56.74	938.8	725.8	0.005391	1.23	0.8392	0.8929	5.357	4.246	3.696
2	90	500	723.8	69.2	793	21.64	0.004345	1.024	0.7984	2.559	5.119	3.562	3.641
3	90	500	673.2	54.71	727.9	11.94	0.003989	1.061	0.8532	1.45	4.349	3.768	3.279
4	90	500	710.3	44.55	754.9	5.14	0.004136	1.204	0.9483	0.9531	3.812	3.118	3.276
5	90	500	718	45.41	763.4	186.4	0.004183	1.22	0.9594	0.7568	3.784	2.987	3.324
6	90	500	695.8	41.34	737.1	34.77	0.004039	1.238	0.9644	0.6025	3.615	3.125	3.224
2	30	750	3302	100.6	3403	16.57	0.01243	3.62	2.076	3.172	6.344	5.09	4.514
3	30	750	3141	90.63	3231	63.36	0.0118	3.329	2.163	2.163	6.488	4.502	4.25
4	30	750	3281	95.89	3376	38.84	0.01233	3.466	2.119	1.641	6.564	4.582	4.278
5	30	750	3092	93.4	3186	16.61	0.01164	3.28	2.145	1.298	6.488	4.504	4.231
6	30	750	2717	89.45	2807	80.56	0.01025	2.796	2.183	1.054	6.326	4.334	4.146
2	60	750	1805	103.7	1908	124.3	0.006971	2.083	1.016	3.326	6.651	4.798	4.242
3	60	750	1551	90.12	1641	215.1	0.005995	1.668	1.177	1.983	5.95	4.197	4.032
4	60	750	1731	89.86	1821	26.49	0.006652	1.99	1.197	1.506	6.025	4.026	4.012
5	60	750	1540	89.41	1629	0.29	0.005952	1.677	1.197	1.167	5.836	4.061	3.986
6	60	750	1730	91.21	1821	84.81	0.006654	2.037	1.201	0.9905	5.943	4.044	4.006
2	90	750	1262	88.27	1351	68.54	0.004934	1.675	0.8533	2.9	5.799	4.058	3.886
3	90	750	1350	104.5	1454	61.96	0.005312	1.868	0.839	1.952	5.857	4.04	4.053
4	90	750	1431	114.1	1545	0.73	0.005644	1.94	0.8477	1.509	6.037	3.742	4.16
5	90	750	1279	100.7	1380	77.11	0.00504	1.639	0.8333	1.184	5.92	3.944	3.968
6	90	750	932.4	83.81	1016	709.4	0.003712	1.23	0.8404	0.8966	5.379	4.229	3.664
2	30	1000	4714	155.3	4870	338.8	0.01334	4.295	2.623	3.342	6.684	5.04	4.939
3	30	1000	4344	125	4469	77	0.01224	4.014	2.737	2.247	6.741	4.762	4.362

4	30	1000	4547	131.7	4679	55.28	0.01282	4.128	2.685	1.705	6.819	4.843	4.384
5	30	1000	4357	130.8	4488	256.3	0.0123	4.021	2.711	1.354	6.769	4.793	4.348
6	30	1000	4397	132.7	4530	153.7	0.01241	4.045	2.691	1.132	6.791	4.816	4.348
2	60	1000	2049	115.1	2164	45.82	0.005929	2.088	1.694	2.996	5.992	4.062	3.992
3	60	1000	1982	119.9	2102	23.81	0.00576	1.982	1.59	2.027	6.082	4.084	4.037
4	60	1000	1970	130	2100	1.506	0.005753	1.983	1.54	1.531	6.125	4.04	4.232
5	60	1000	2008	103.4	2111	10.85	0.005783	2.19	1.688	1.152	5.761	3.9	3.819
6	60	1000	1943	119.2	2062	136.5	0.00565	1.971	1.533	1.012	6.071	4.073	4.031
2	90	1000	1507	123.2	1631	15.82	0.004467	1.614	0.9263	3.372	6.744	4.611	3.997
3	90	1000	1437	120.5	1558	1.052	0.004268	1.62	1.058	1.98	5.94	4.169	4.001
4	90	1000	1642	124.3	1766	46.65	0.004839	1.996	1.077	1.502	6.02	4.01	4.005
5	90	1000	1307	122.2	1430	30.4	0.003917	1.454	1.069	1.143	5.716	4.152	3.947
6	90	1000	1240	125.2	1365	7.839	0.003741	1.381	1.068	0.9338	5.603	4.231	3.927
2	30	1250	4106	202.2	4308	31.31	0.009442	3.821	2.606	3.457	6.914	7.5	4.736
3	30	1250	4818	182.9	5001	54.05	0.01096	4.182	3.056	2.25	6.75	5.698	4.673
4	30	1250	5058	204.8	5236	41.21	0.01154	4.259	3.134	1.704	6.814	5.15	4.985
5	30	1250	4979	159.2	5138	68.22	0.01126	4.129	3.337	1.358	6.789	4.809	4.339
6	30	1250	5047	183.2	5230	2.43	0.01146	4.218	3.031	1.167	7.004	5.402	4.546
2	60	1250	2553	139	2692	300	0.005901	2.753	1.896	3.146	6.292	4.302	4.161
3	60	1250	2887	163.5	3051	50.59	0.006687	3.206	1.773	2.182	6.546	4.559	4.292
4	60	1250	3067	190.1	3257	153.3	0.007138	3.345	1.637	1.714	6.856	4.875	4.427
5	60	1250	2255	233	2488	6.18	0.005453	2.414	1.815	1.206	6.031	4.229	5.156
6	60	1250	2270	152.3	2422	256.4	0.00531	2.264	1.87	1.029	6.177	4.181	4.079

2	90	1250	1739	155.8	1895	9.087	0.004154	1.826	1.457	2.874	5.748	4.018	4.096
3	90	1250	1830	140.4	1970	21.91	0.004318	2.023	1.352	1.99	5.969	4.012	3.98
4	90	1250	1812	146.4	1959	21.42	0.004293	1.984	1.315	1.51	6.041	4.043	4.019
5	90	1250	1805	148.2	1954	24.48	0.004282	1.979	1.306	1.206	6.047	4.048	4.021
6	90	1250	1828	148.8	1976	52.56	0.004332	2.034	1.307	1.007	6.04	4.041	4.018
2	30	1500	4872	275.9	5148	107.3	0.009403	3.77	2.801	4.06	8.121	6.405	5.369
3	30	1500	5000	267.8	5268	38.18	0.009622	3.996	3.131	2.46	7.379	6.134	5.165
4	30	1500	4767	256.1	5023	15.6	0.009174	3.939	3.1	1.8	7.201	6.71	4.74
5	30	1500	5321	230.1	5551	53.76	0.01014	4.211	3.6	1.344	6.718	5.708	4.643
6	30	1500	5619	220.9	5840	76.27	0.01067	4.188	3.446	1.228	7.366	5.309	4.596
2	60	1500	3315	197.1	3512	17.57	0.006415	3.62	2.075	3.184	6.369	5.09	4.464
3	60	1500	3140	181.2	3322	75.15	0.006067	3.329	2.163	2.163	6.488	4.502	4.25
4	60	1500	3283	191.8	3475	42.96	0.006346	3.468	2.119	1.641	6.565	4.583	4.278
5	60	1500	3142	185.9	3328	222	0.006078	3.0343	2.154	1.295	6.473	4.488	4.223
6	60	1500	2713	179.4	2892	253.5	0.005282	2.786	2.188	1.054	6.324	4.332	4.145
2	90	1500	2055	181.5	2236	334.3	0.004085	2.044	1.667	3.051	6.103	4.107	4.049
3	90	1500	1981	181.1	2162	8.916	0.003949	1.974	1.596	2.027	6.08	4.082	4.035
4	90	1500	1888	176.8	2065	16.67	0.003772	1.988	1.534	1.469	5.876	4.402	4.025
5	90	1500	1947	289.1	2236	20	0.004085	1.849	1.603	1.227	6.136	3.696	4.695
6	90	1500	2062	181.25	2243	90.64	0.004097	2.162	1.503	1.039	6.234	4.11	4.095
2	30	1750	5360	324.9	5685	0.136	0.0089	3.854	3.158	4.117	8.233	6.924	5.277
3	30	1750	5124	332.8	5457	112.3	0.008543	3.759	3.071	2.739	8.218	7.061	5.081
4	30	1750	5033	381.2	5414	28.96	0.008476	3.678	3.094	2.058	8.23	6.445	5.554

6	30	1750	5844	297.8	6142	4.465	0.009616	4.053	3.475	1.327	7.962	5.807	4.856
2	60	1750	4267	221.2	4488	159.7	0.007027	4.065	2.395	3.386	6.772	4.789	4.421
3	60	1750	3711	214.9	3926	20.95	0.006147	3.701	2.459	2.206	6.618	4.635	4.308
4	60	1750	3904	227.4	270	270	0.006468	3.841	2.397	1.676	6.704	4.725	4.337
5	60	1750	3871	224.9	4096	179.7	0.006412	3.83	2.438	1.328	6.639	4.658	4.295
6	60	1750	3705	225.7	3931	140.1	0.006154	3.699	2.416	1.108	6.647	4.669	4.291
2	90	1750	2475	197.5	2673	176.8	0.004184	2.717	1.768	3.147	6.295	4.303	4.166
3	90	1750	2172	336.5	2509	8.9	0.003928	2.357	1.774	1.974	5.922	4.099	5.224
4	90	1750	2234	205.9	2440	99.49	0.00382	2.286	1.77	1.545	6.179	4.185	4.086
5	90	1750	2153	216.5	2370	5.344	0.00371	2.125	1.779	1.226	6.13	4.134	4.058
6	90	1750	2224	199.4	2423	1.327	0.003793	2.338	1.825	1.003	6.02	4.058	4.017
2	30	2000	5963	429.2	6393	184.5	0.008757	3.897	3.315	4.395	8.791	7.203	5.6
4	30	2000	5593	515.9	6109	48.05	0.008369	3.821	3.329	2.103	8.411	6.748	6.006
5	30	2000	5561	478.3	6039	21.15	0.008273	3.777	3.318	1.697	8.486	6.729	5.681
6	30	2000	5577	431.6	6009	96.29	0.008231	3.93	3.498	1.308	7.85	7.219	5.148
2	60	2000	4725	305.9	5031	333.6	0.006892	4.295	2.623	3.349	6.699	5.043	4.902
3	60	2000	4344	250	4594	84.9	0.006293	4.014	2.737	2.247	6.741	4.762	4.361
4	60	2000	4547	263.3	4810	21.16	0.00659	4.128	2.684	1.705	6.819	4.843	4.383
5	60	2000	4357	261.6	4619	244	0.006327	4.021	2.711	1.354	6.769	4.793	4.347
6	60	2000	4394	265.2	4659	128.5	0.006383	4.043	2.69	1.132	6.79	4.815	4.347
2	90	2000	3036	241.3	3277	1.816	0.004489	3.32	1.939	3.247	6.495	4.505	4.281
3	90	2000	3325	281.5	3606	87.9	0.00494	3.572	1.817	2.243	6.728	4.742	4.385
4	90	2000	2670	238.3	2908	129.9	0.003983	2.871	1.958	1.587	6.349	4.361	4.171

5	90	2000	2899	258.3	3157	92.02	0.004325	3.168	1.894	1.301	6.503	4.522	4.242
6	90	2000	2924	263.9	3188	16.35	0.004364	3.193	1.877	1.09	6.537	4.56	4.25
2	30	2250	6826	552.2	7378	186.9	0.008984	4.082	3.568	4.52	9.04	7.5	5.907
4	30	2250	6688	502	7190	4.99	0.008755	3.954	3.554	2.309	9.237	7.069	5.245
5	30	2250	6218	570.6	6789	173.6	0.008266	3.918	3.557	1.734	8.672	7.307	5.596
6	30	2250	6342	546.2	6888	196.3	0.008388	3.998	3.654	1.409	8.457	7.214	5.428
2	60	2250	4735	388	5123	280.5	0.006239	4.131	2.666	3.555	7.11	5.359	5.207
3	60	2250	5028	286.6	5314	1.28	0.006471	4.274	3.001	2.288	6.863	4.885	4.413
4	60	2250	5142	296.9	5439	241	0.006622	4.334	2.95	1.727	6.91	4.936	4.416
5	60	2250	5044	424.9	5344	424.9	0.006507	4.282	2.983	1.377	6.883	4.909	4.39
6	60	2250	4876	296.8	5172	3.246	0.006298	4.204	2.975	1.142	6.855	4.88	4.367
2	90	2250	3607	283	3890	346.6	0.004736	3.731	2.124	3.322	6.643	4.656	4.36
3	90	2250	3140	271.7	3412	86.92	0.004155	3.328	2.163	2.163	6.488	4.502	4.249
4	90	2250	3285	287.7	3573	48.07	0.00435	3.47	2.119	1.642	6.566	4.584	4.278
5	90	2250	3092	279.9	3372	10.29	0.004106	3.281	2.145	1.297	6.487	4.503	4.229
6	90	2250	2712	269	2981	247	0.00363	2.785	2.188	1.054	6.323	4.332	4.144
4	30	2500	7809	679	8488	8.304	0.009301	4.122	3.818	2.416	9.663	7.393	5.532
5	30	2500	7549	803.4	8353	18.91	0.009154	4.075	3.825	1.892	9.458	7.5	5.851
2	60	2500	4330	408.9	4739	19.93	0.005193	3.859	2.624	3.592	7.185	6.646	4.992
3	60	2500	4852	357.1	5209	34.02	0.005708	4.184	3.057	2.263	6.79	5.685	4.605
4	60	2500	5071	402.1	5473	51.9	0.005998	4.257	3.131	1.71	6.839	5.155	4.934
5	60	2500	4991	318.6	5309	66.45	0.005818	4.136	3.335	1.358	6.792	4.812	4.34
6	60	2500	4878	379.7	5257	154.7	0.005762	4.193	3.016	1.141	6.844	5.613	4.605

2	90	2500	4126	319.8	4446	125.8	0.004872	4.01	2.296	3.378	6.756	4.771	4.416
3	90	2500	3519	305.7	3825	126.6	0.004191	3.586	2.368	2.192	6.575	4.591	4.288
4	90	2500	3727	325.2	4052	11.88	0.004441	3.75	2.309	1.667	6.668	4.688	4.322
5	90	2500	3511	317.7	3829	46.08	0.004196	3.583	2.336	1.319	6.595	4.614	4.276
6	90	2500	3515	320.7	3836	7.05	0.004204	3.587	2.326	1.1	6.602	4.623	4.272
6	30	2750	7865	1075	8940	11.24	0.008906	4.166	3.241	1.795	10.77	7.5	7.5
2	60	2750	4660	448.3	5108	149.5	0.005089	3.786	2.698	3.92	7.839	6.422	5.018
3	60	2750	5081	494.9	5576	174.1	0.005555	4.121	3.125	2.399	7.197	5.44	5.278
4	60	2750	5114	528.9	5643	19.2	0.005622	4.129	3.113	1.809	7.237	5.333	5.403
5	60	2750	5334	414.3	5748	127.5	0.005726	4.304	3.543	1.32	6.602	5.176	4.734
6	60	2750	5034	425.6	5460	62.53	0.00544	4.104	3.093	1.201	7.207	5.794	4.613
2	90	2750	4550	350.8	4901	10.58	0.004883	4.188	2.486	3.412	6.825	4.843	4.445
3	90	2750	3644	353.5	3997	42.12	0.003982	3.743	2.511	2.123	6.368	5.174	4.364
4	90	2750	4158	361.4	4519	151.7	0.004502	3.967	2.5	1.688	6.752	4.774	4.357
5	90	2750	3904	353	4257	129.3	0.005726	3.806	2.518	1.336	6.682	4.703	4.311
6	90	2750	4653	385.2	5038	19.96	0.00502	4.249	2.459	1.139	6.837	4.864	4.374
2	30	3000	9912	936.2	10848	28.81	0.009907	4.334	3.834	5.716	11.43	7.5	6.56
2	60	3000	4867	557.7	5425	95.75	0.004954	3.775	2.804	4.048	8.096	6.405	5.402
3	60	3000	5094	503.8	5597	1.13	0.005112	3.983	3.117	2.521	7.564	6.038	4.987
4	60	3000	4901	477.6	5379	93.62	0.004912	3.945	3.099	1.848	7.391	6.611	4.513
5	60	3000	5357	447.2	5804	47.44	0.0053	4.215	3.602	1.35	6.752	5.708	4.556
6	60	3000	4785	521.1	5306	15.52	0.004846	3.897	3.018	1.237	7.42	6.602	4.696
2	90	3000	4733	456.8	5190	8.474	0.00474	4.288	2.619	3.366	6.733	5.062	4.88

3	90	3000	4344	374.8	4719	92.81	0.004309	4.015	2.737	2.247	6.741	4.762	4.36
4	90	3000	4547	394.7	4942	12.93	0.004513	4.129	2.682	1.705	6.82	4.844	4.383
5	90	3000	4357	392.2	4750	231.6	0.004338	4.021	2.71	1.354	6.769	4.739	4.346
6	90	3000	4374	396.5	4770	46.65	0.004356	4.032	2.69	1.131	6.785	4.811	4.344

Graficas

250 litros:

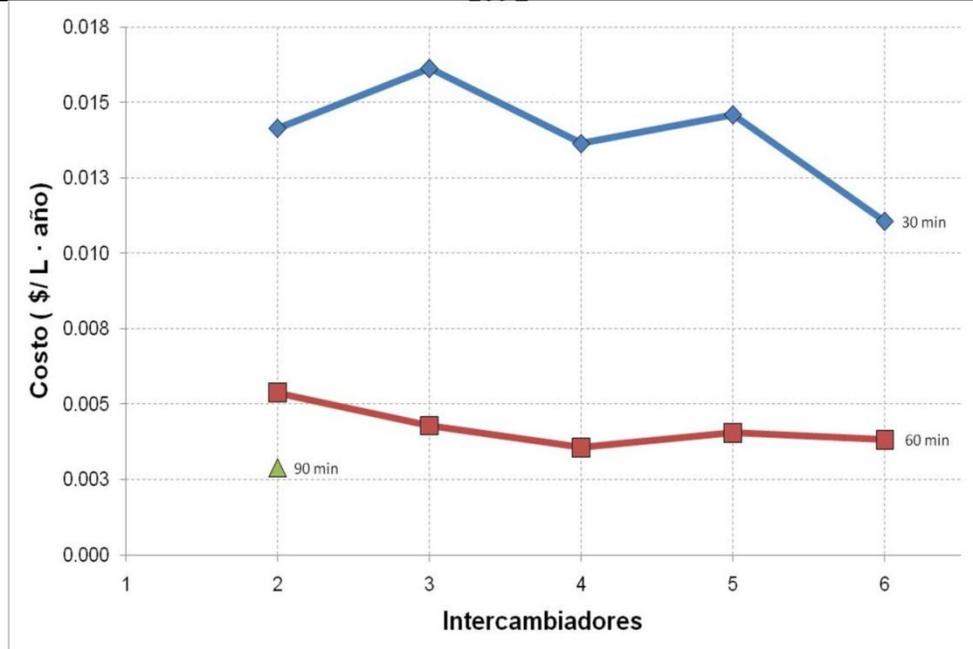


Ilustración 42 Costos para 250L. , 30, 60 y 90 min.

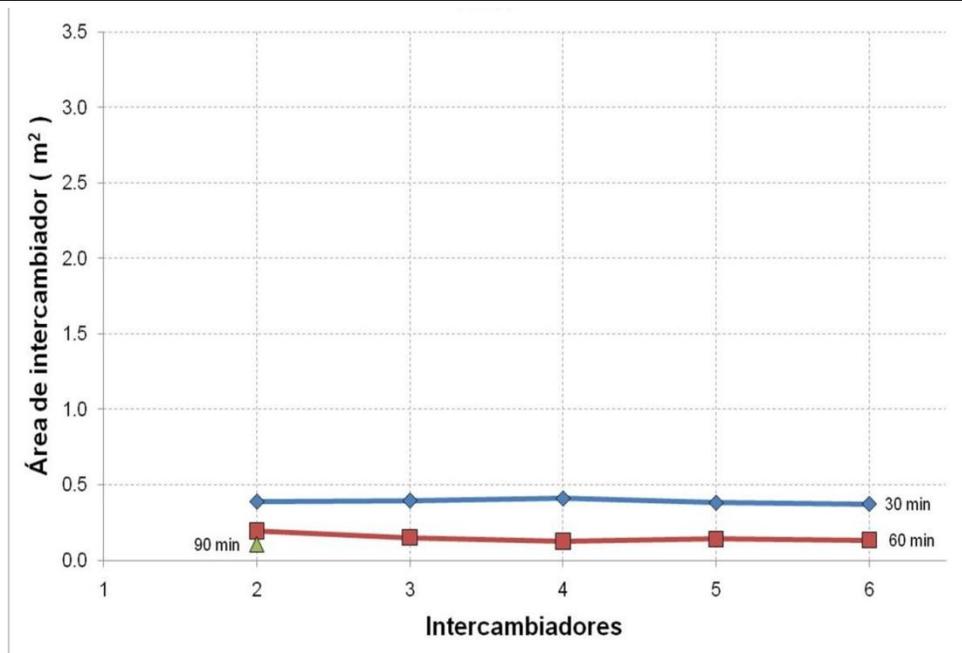


Ilustración 43 Área hx para 250L. , 30, 60 y 90 min.

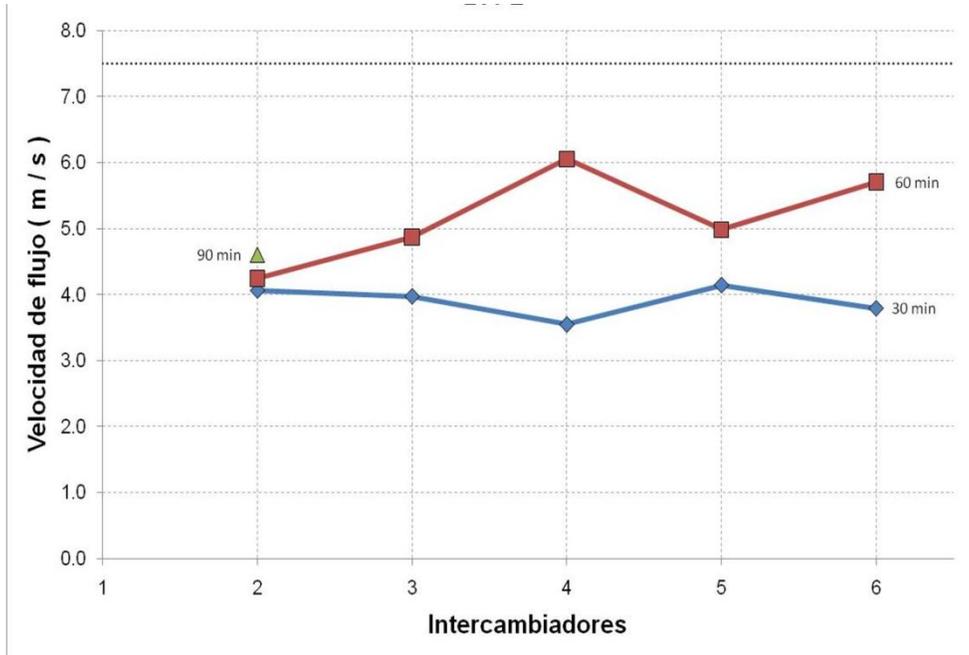


Ilustración 44 Velocidad de leche para 250L. , 30, 60 y 90 min

500 litros

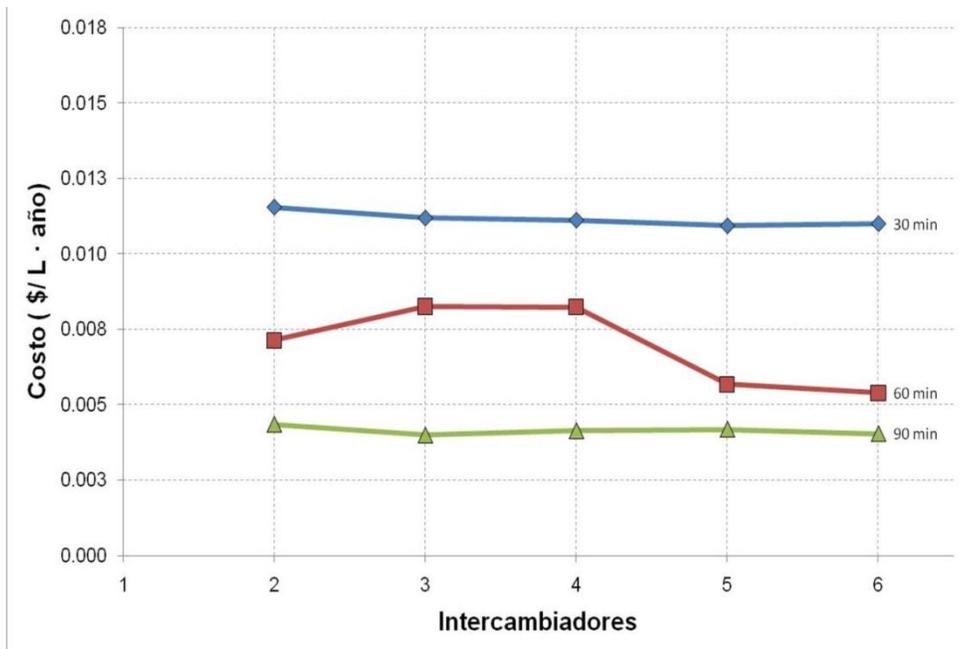


Ilustración 45 Costos para 500L. , 30, 60 y 90 min.

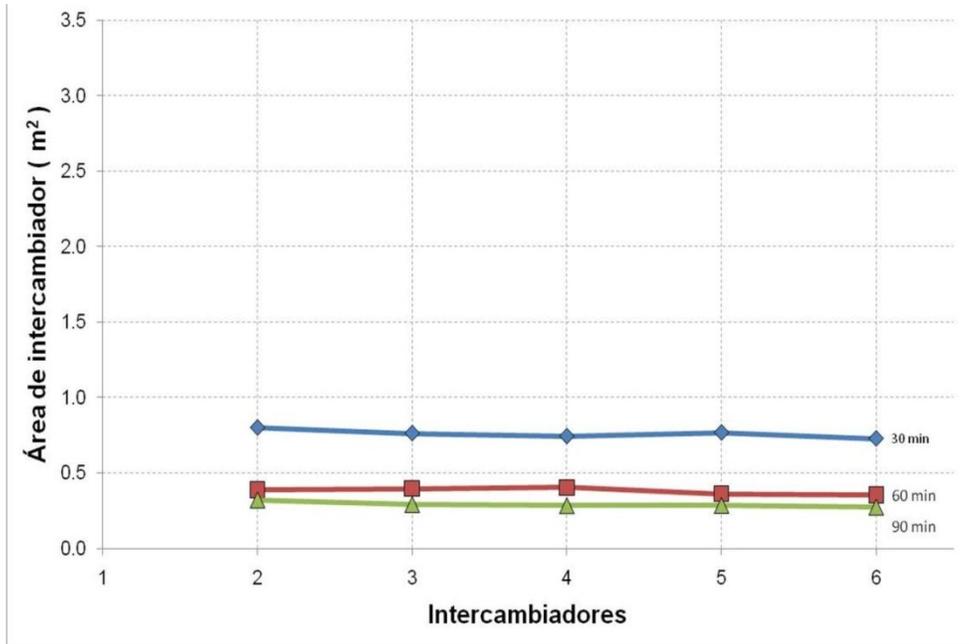


Ilustración 46 Área hx para 500L. , 30, 60 y 90 min

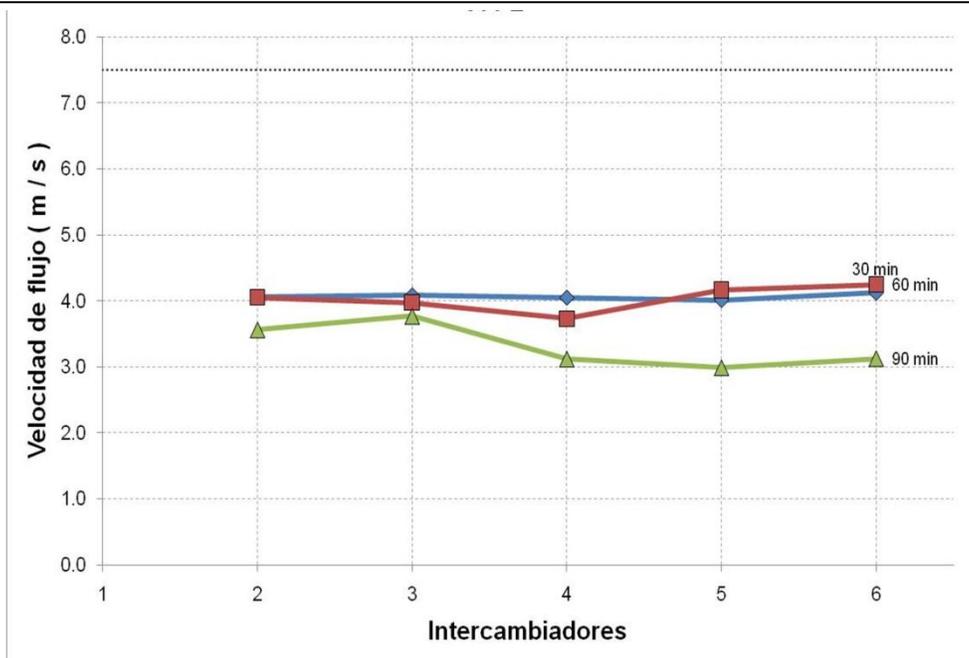


Ilustración 47 Velocidad de leche para 500L. , 30, 60 y 90 min

750 litros

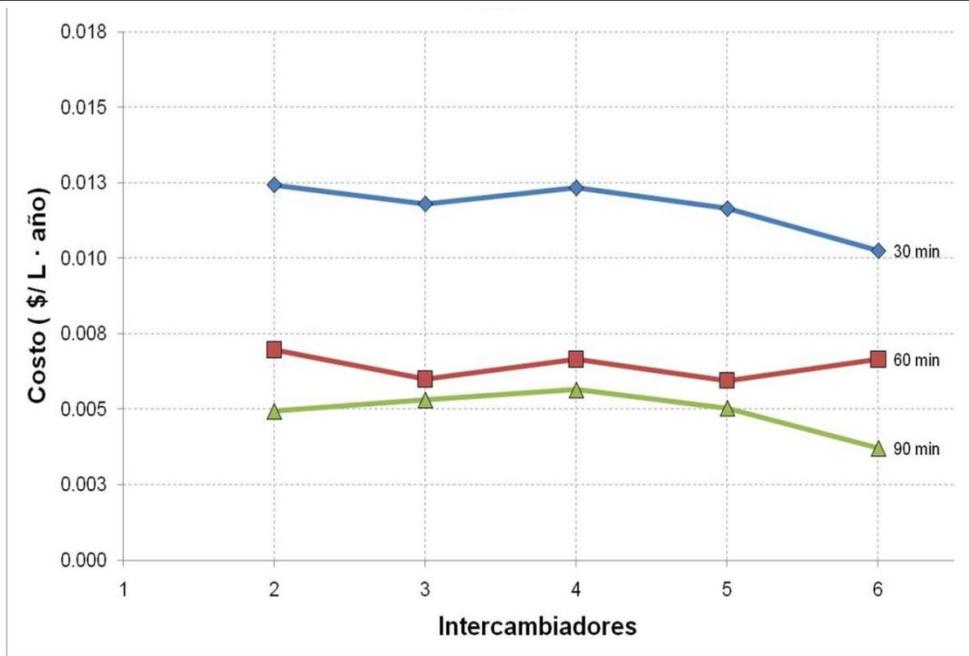


Ilustración 48 Costos para 750L. , 30, 60 y 90 min.

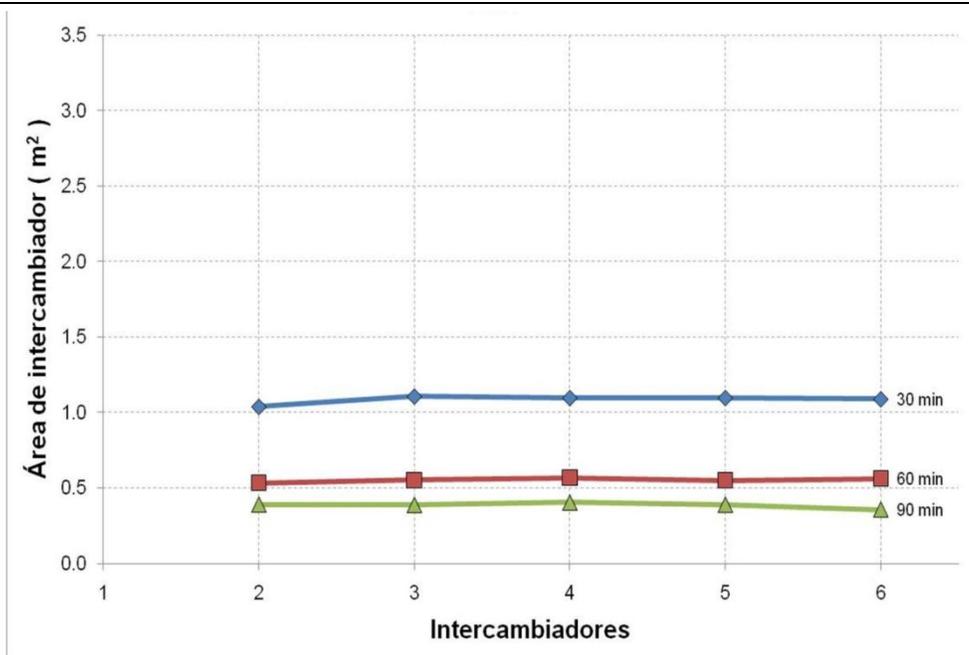


Ilustración 49 Área hx para 750L. , 30, 60 y 90 min

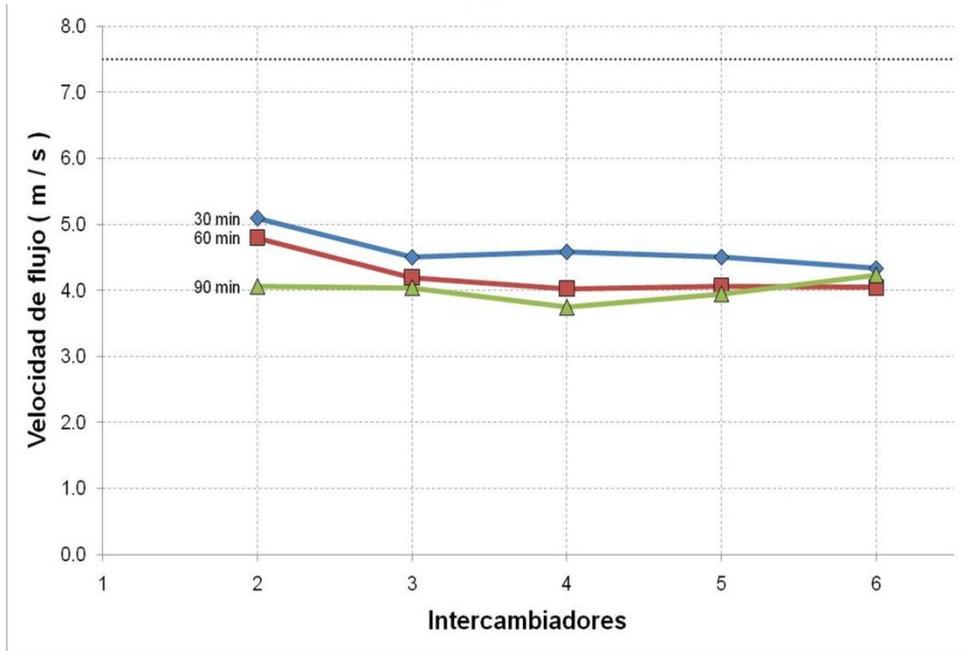


Ilustración 50 Velocidad de leche para 750L. , 30, 60 y 90 min

1000 litros

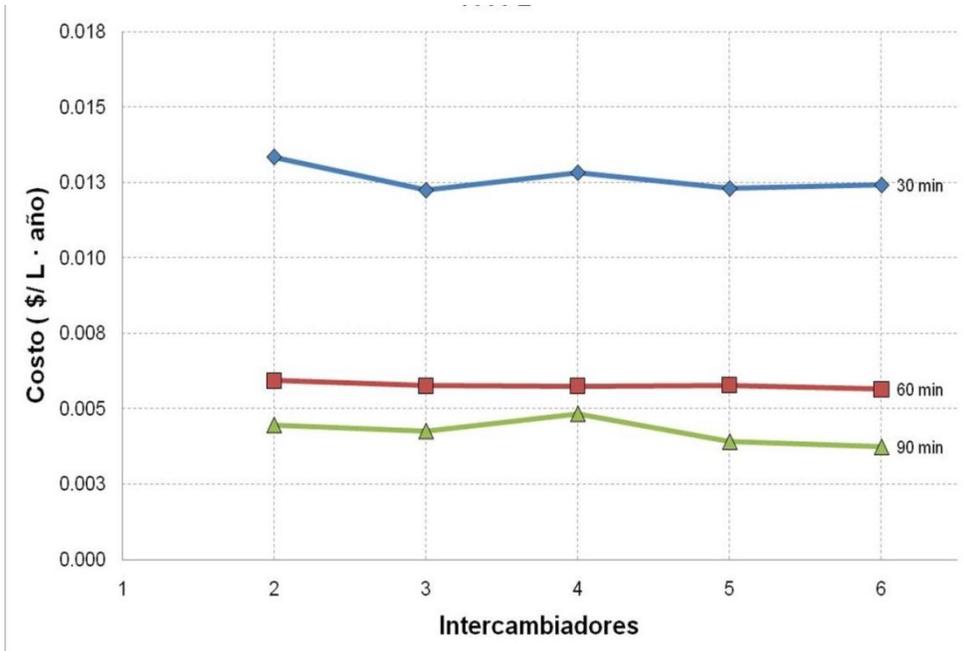


Ilustración 51 Costos para 1000L. , 30, 60 y 90 min.

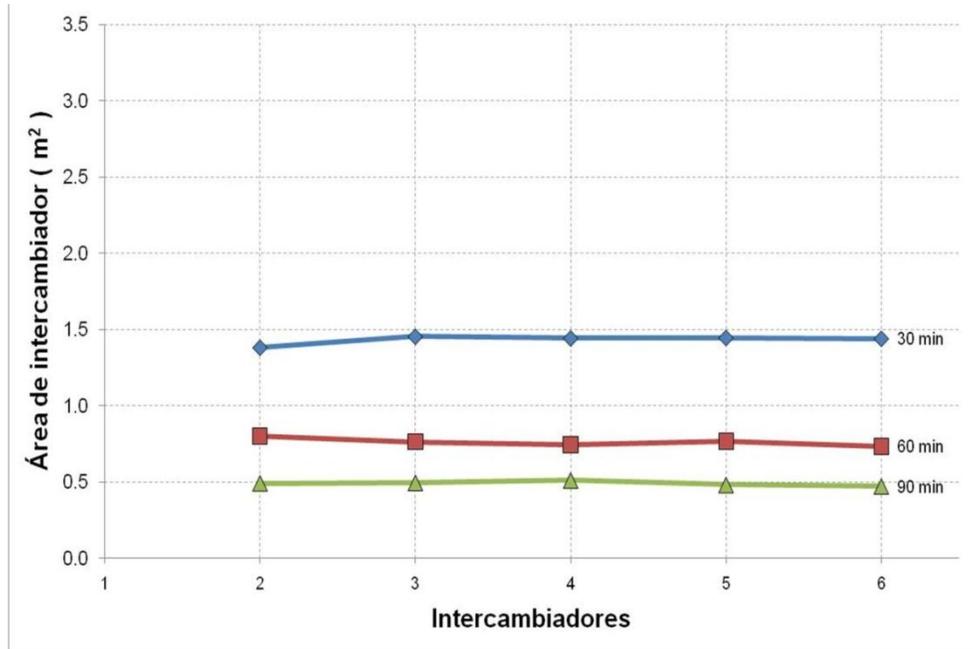


Ilustración 52 Área hx para 1000L. , 30, 60 y 90 min

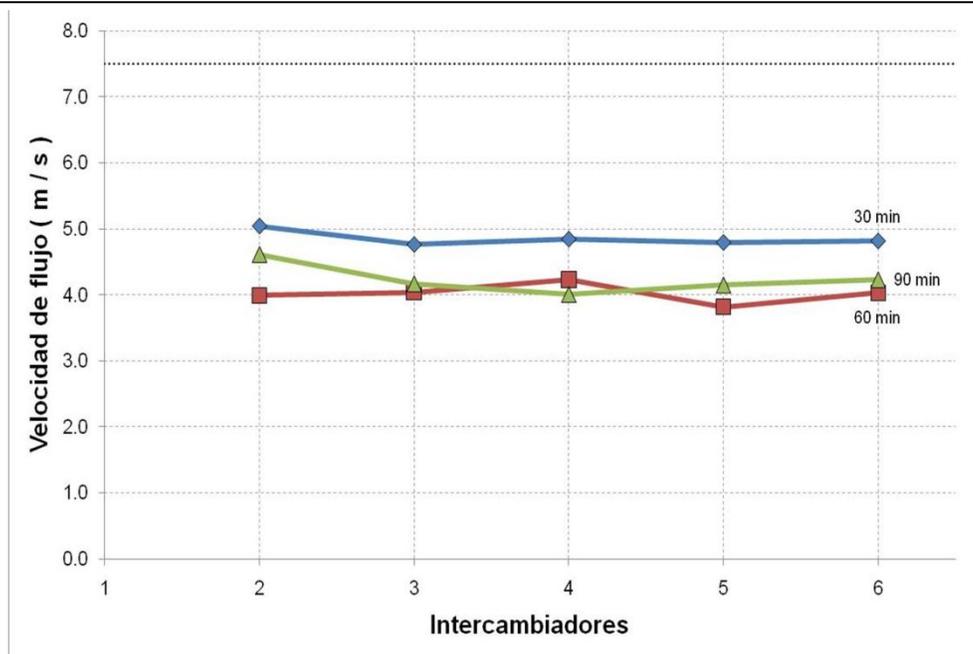


Ilustración 53 Velocidad de leche para 1000L. , 30, 60 y 90 min

1250 litros

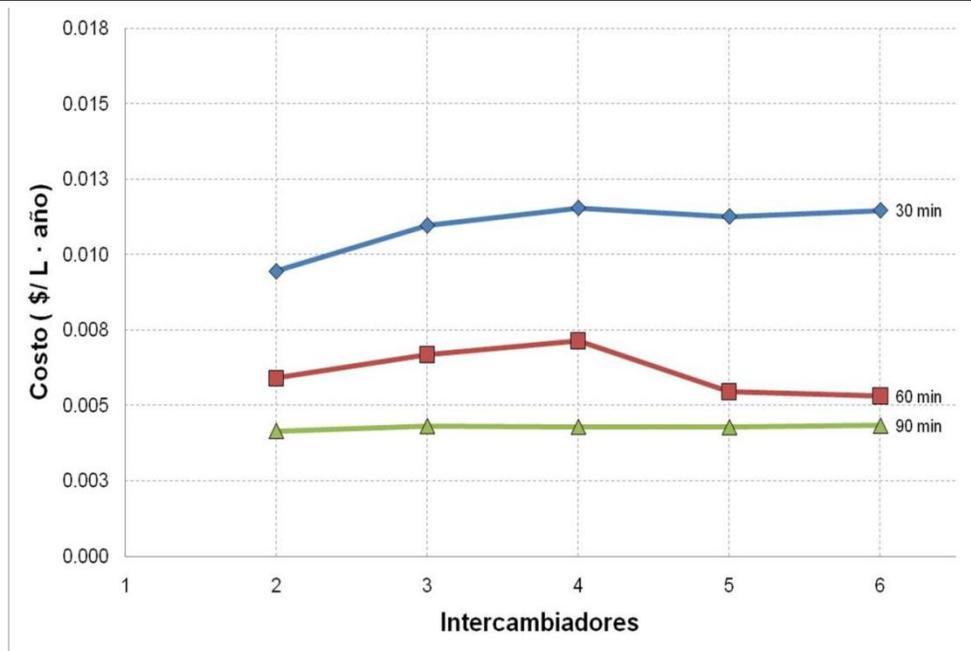


Ilustración 54 Costos para 1250L. , 30, 60 y 90 min.

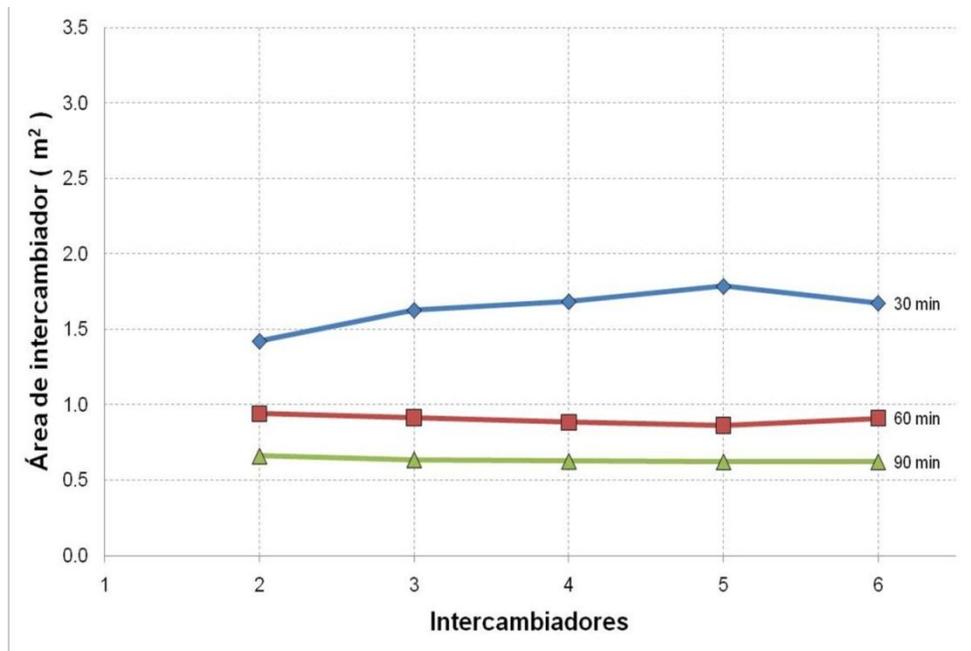


Ilustración 55 Área hx para 1250L. , 30, 60 y 90 min

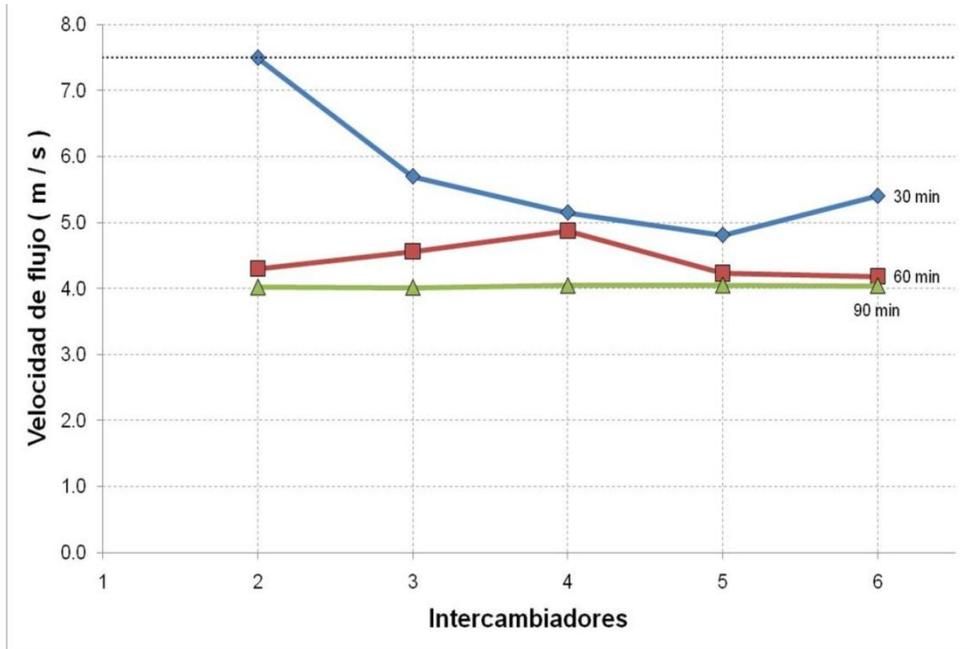


Ilustración 56 Velocidad de leche para 1250L. , 30, 60 y 90 min

1500 litros

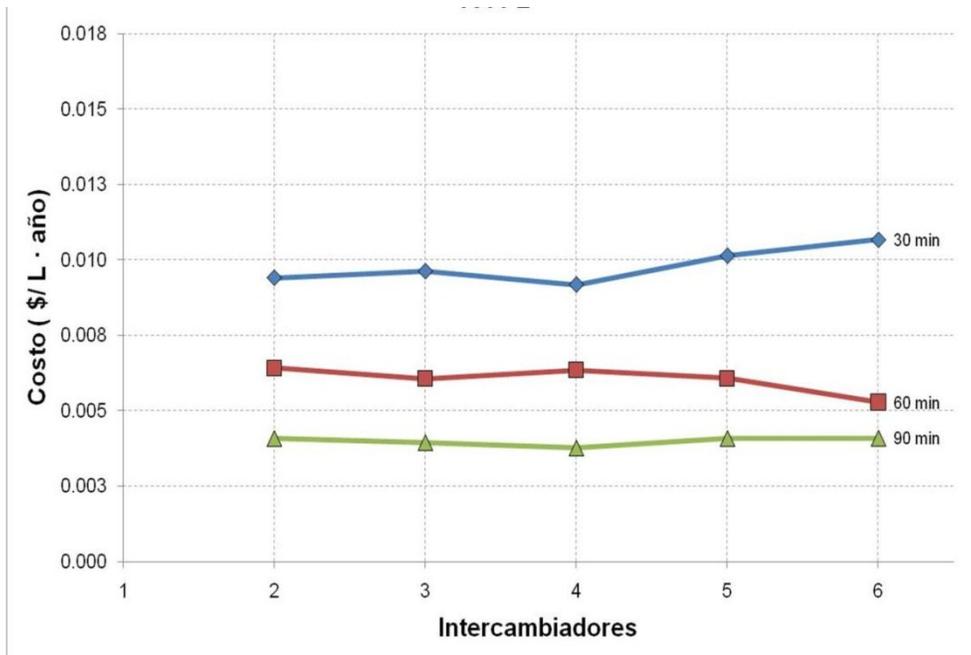


Ilustración 57 Costos para 1500L. , 30, 60 y 90 min.

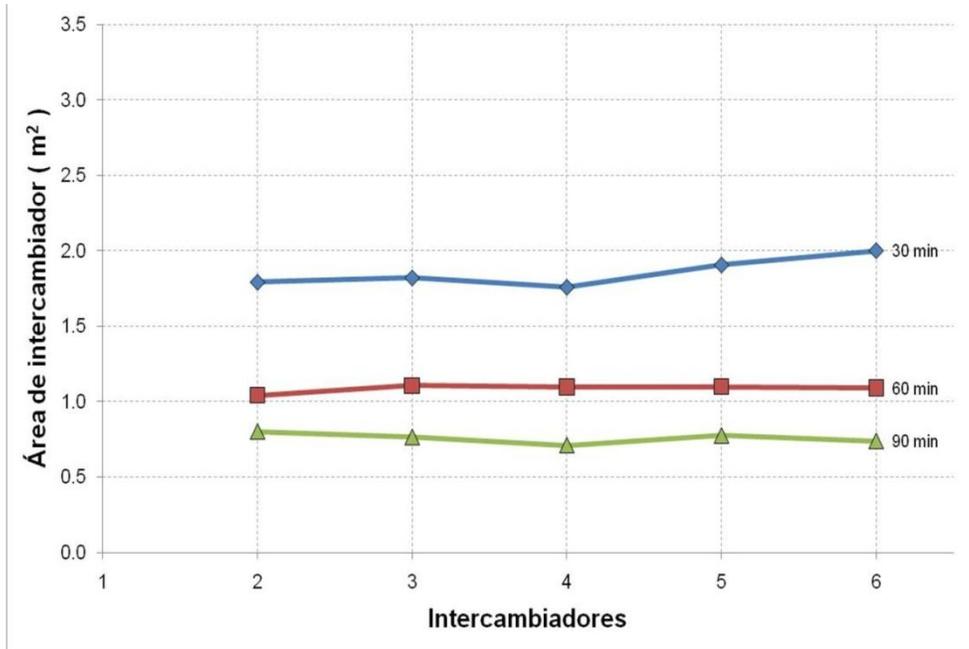


Ilustración 58 Área hx para 1500L. , 30, 60 y 90 min

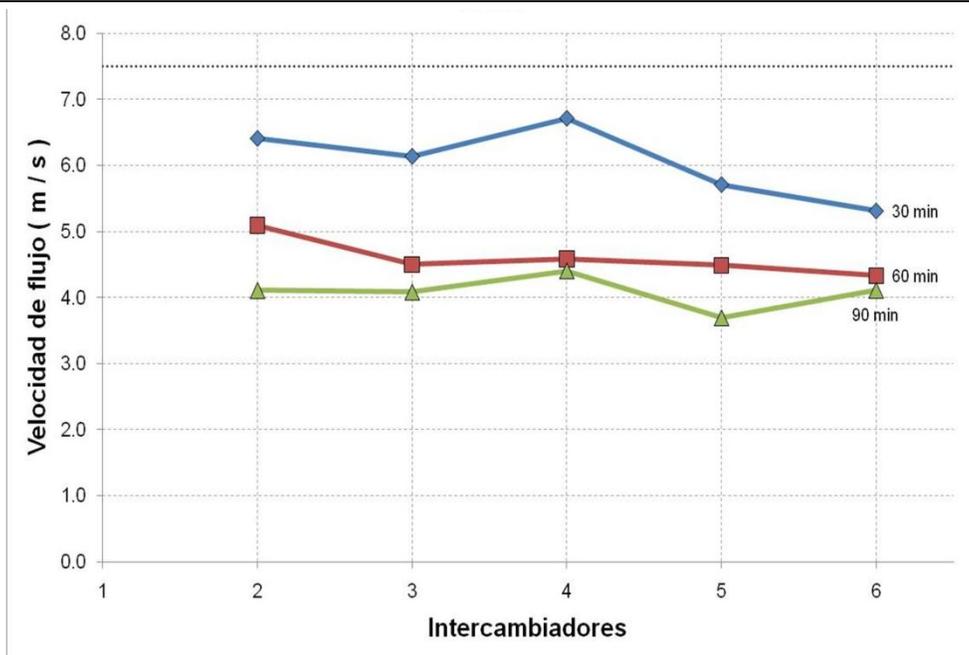


Ilustración 59 Velocidad de leche para 1500L. , 30, 60 y 90 min

1750 litros

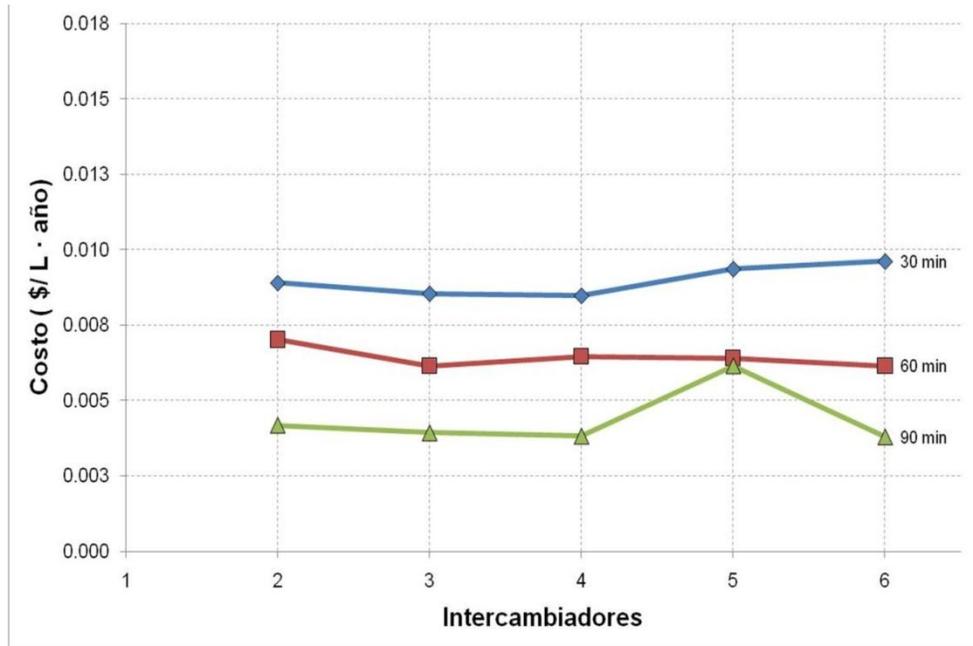


Ilustración 60 Costos para 1750L. , 30, 60 y 90 min.

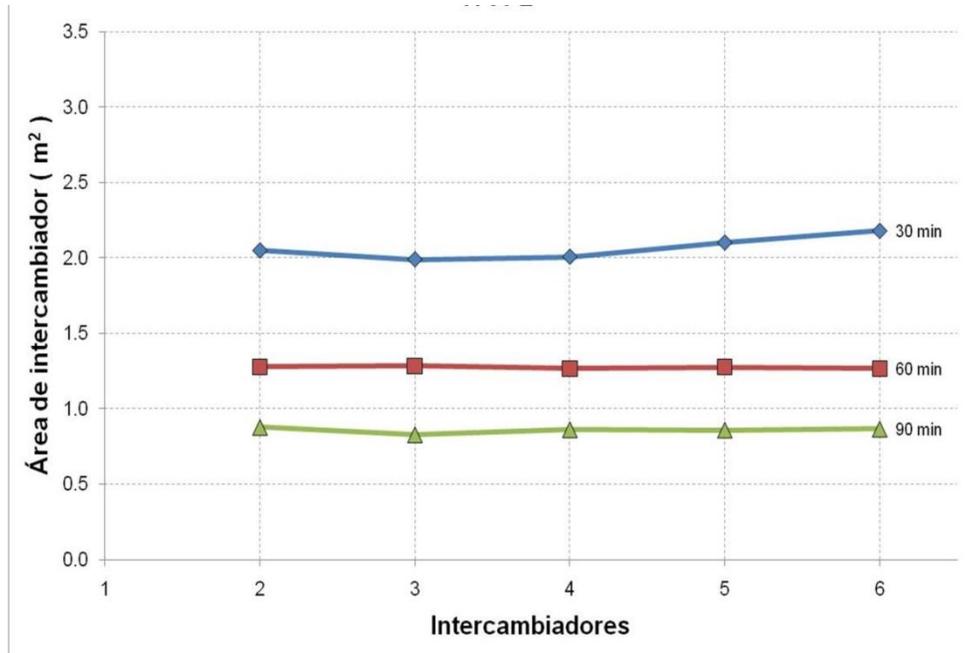


Ilustración 61 Área hx para 1750L. , 30, 60 y 90 min

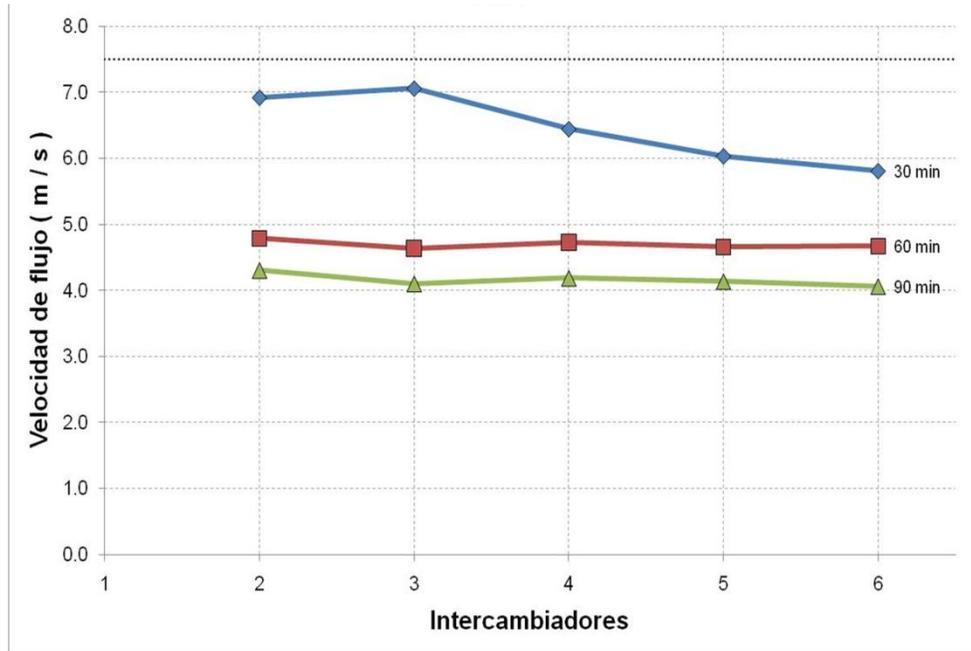


Ilustración 62 Velocidad de leche para 1750L. , 30, 60 y 90 min

2000 litros

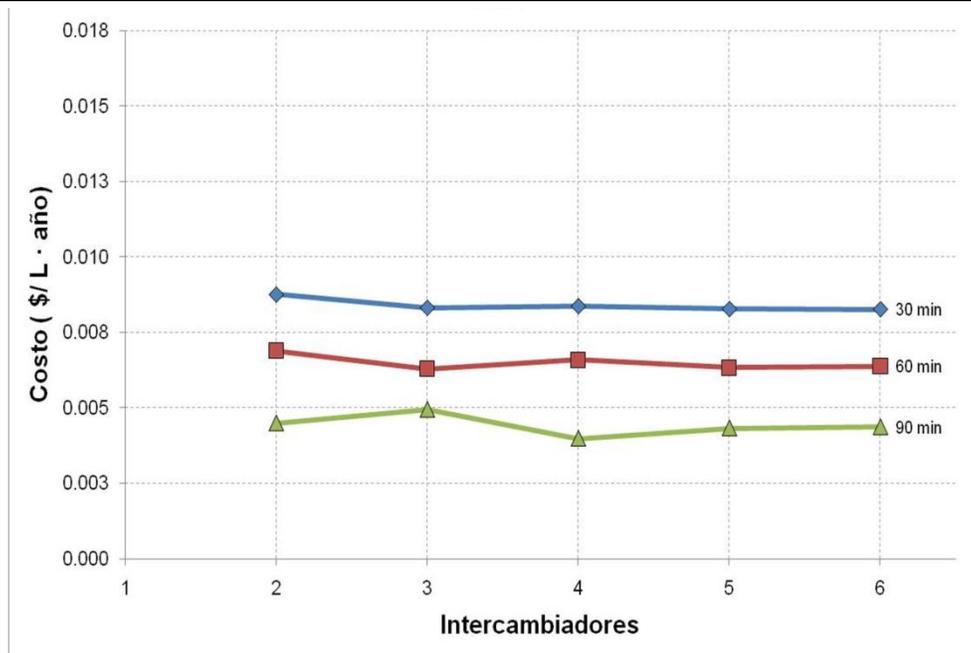


Ilustración 63 Costos para 2000L. , 30, 60 y 90 min.

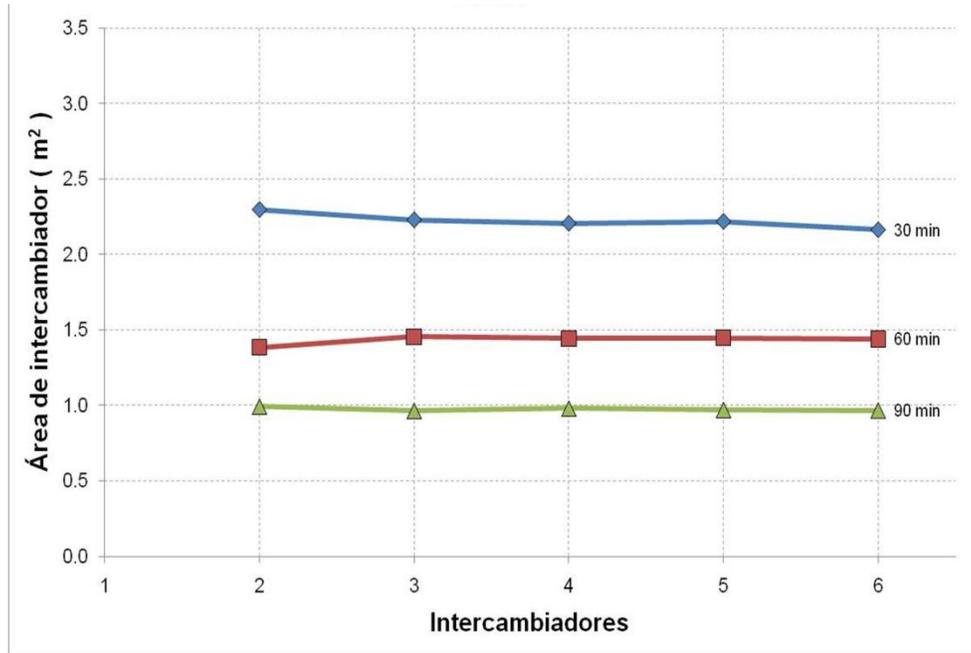


Ilustración 64 Área hx para 2000L. , 30, 60 y 90 min

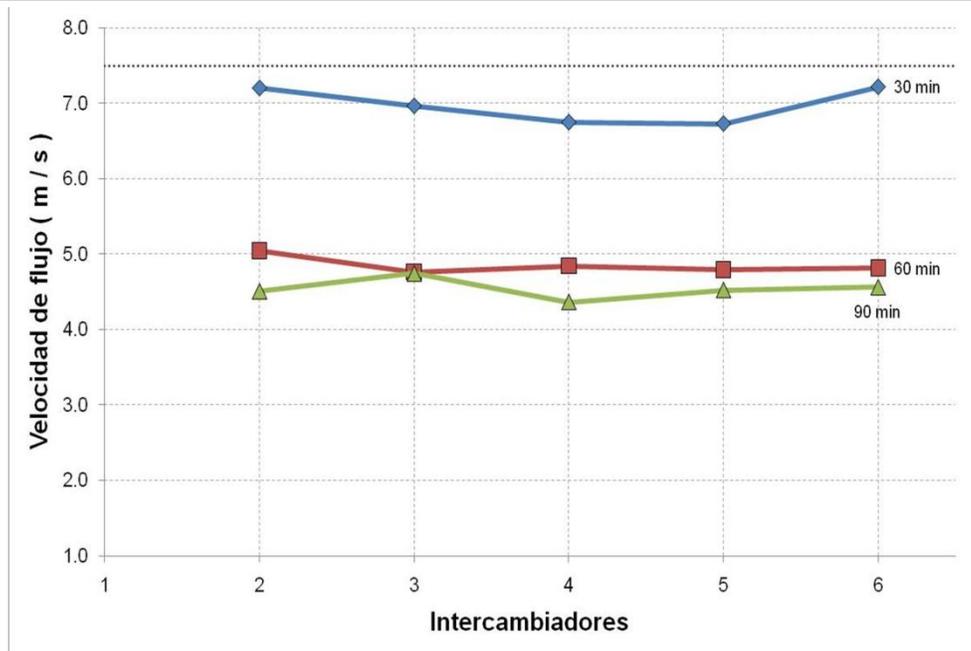


Ilustración 65 Velocidad de leche para 2000L. , 30, 60 y 90 min

2250 litros

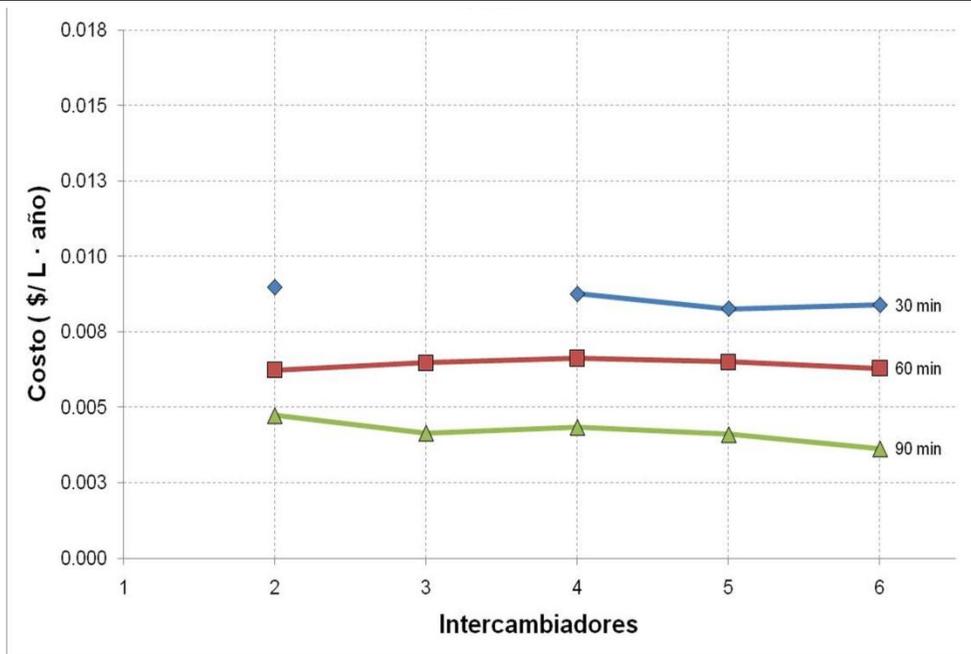


Ilustración 66 Costos para 2250L. , 30, 60 y 90 min.

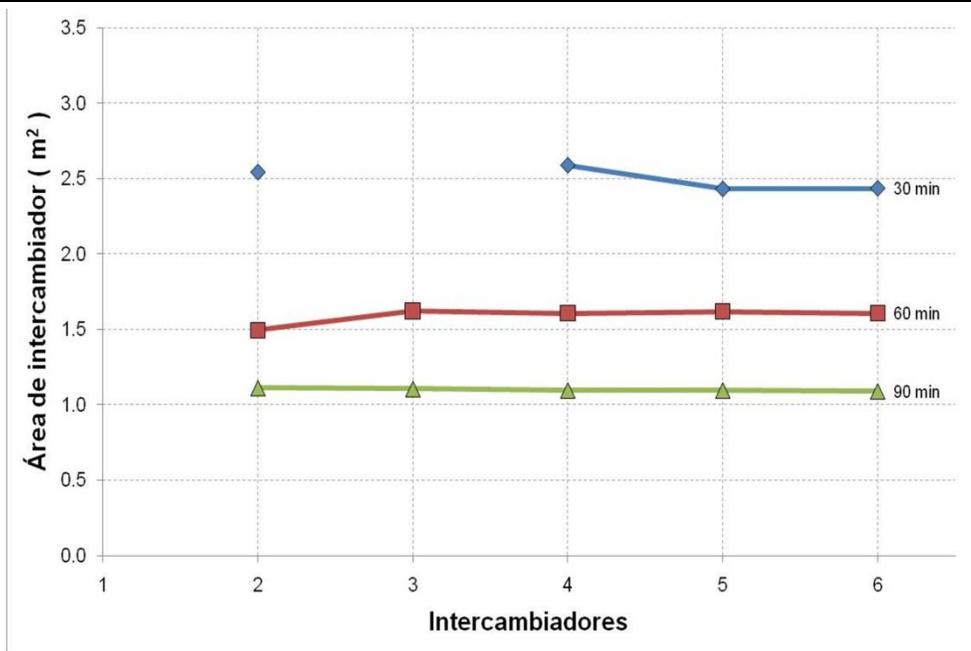


Ilustración 67 Área hx para 2250L. , 30, 60 y 90 min

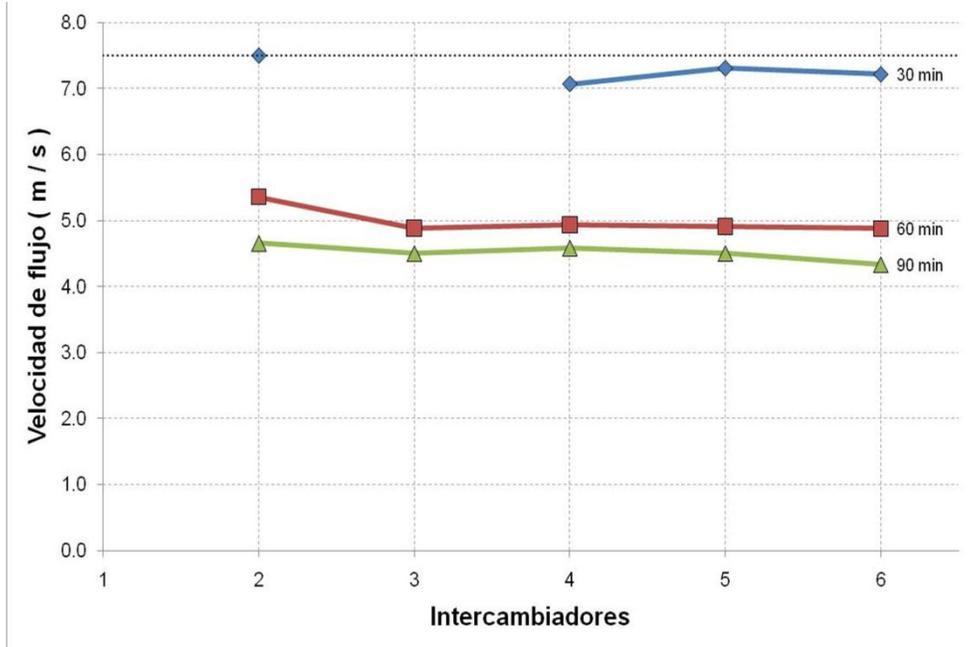


Ilustración 68 Velocidad de leche para 2250L. , 30, 60 y 90 min

2500 litros

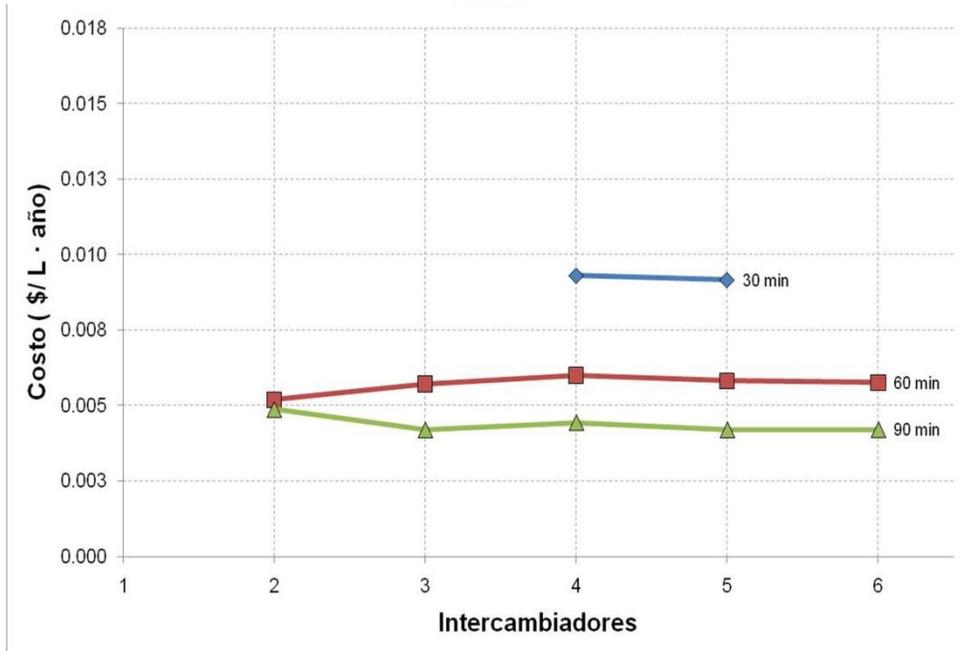


Ilustración 69 Costos para 2500L. , 30, 60 y 90 min.

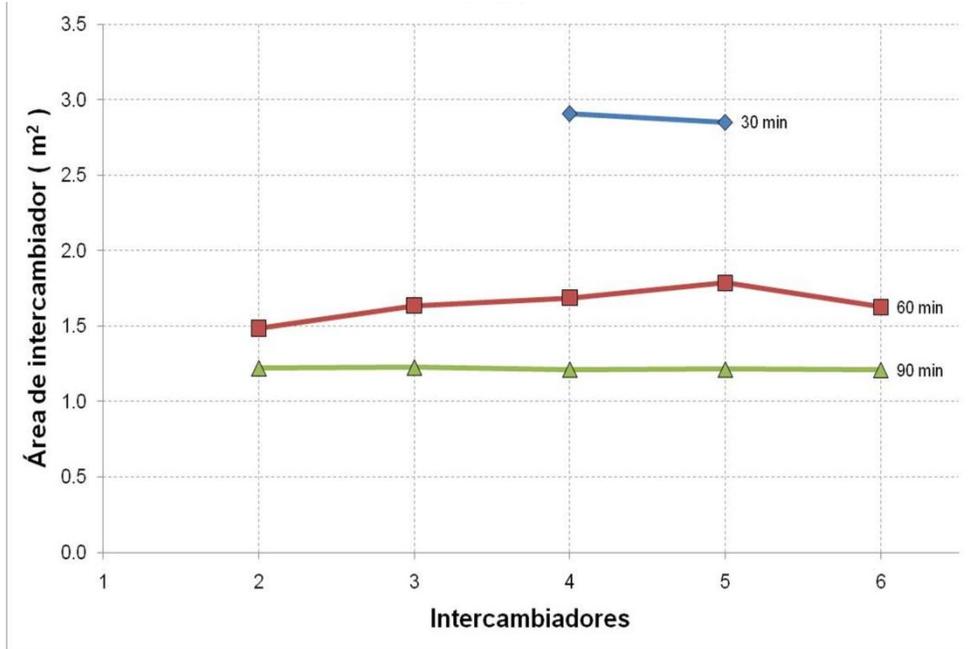


Ilustración 70 Área hx para 2500L. , 30, 60 y 90 min

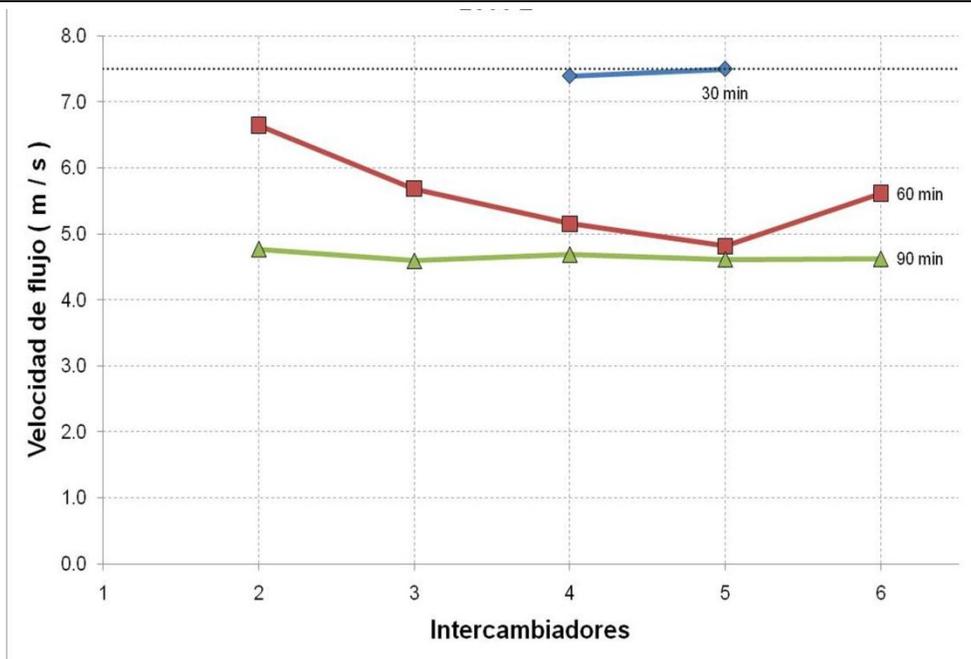


Ilustración 71 Velocidad de leche para 2500L. , 30, 60 y 90 min

2750 litros

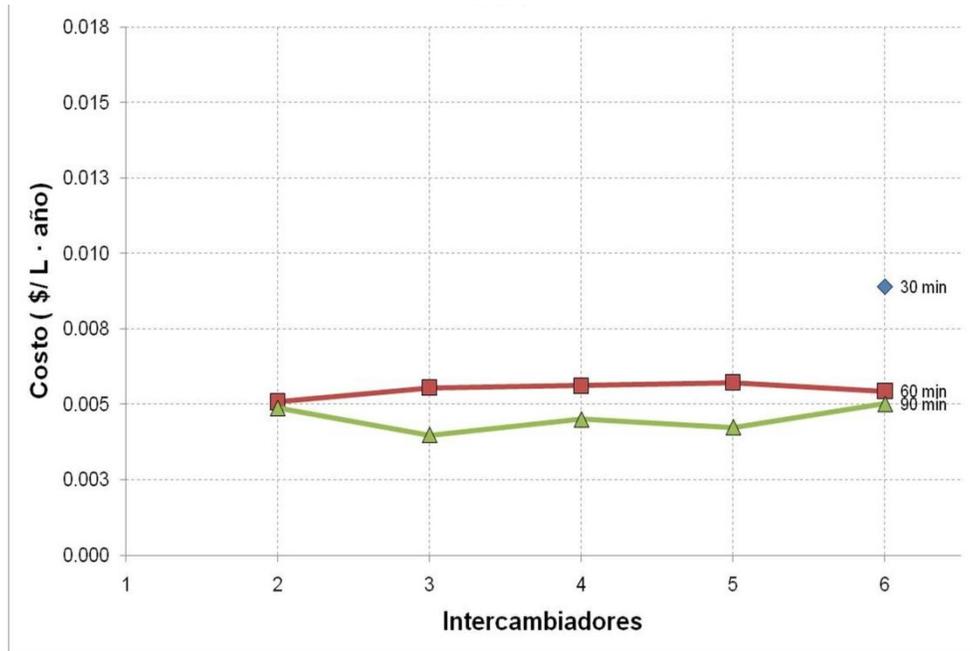


Ilustración 72 Costos para 2750L. , 30, 60 y 90 min.

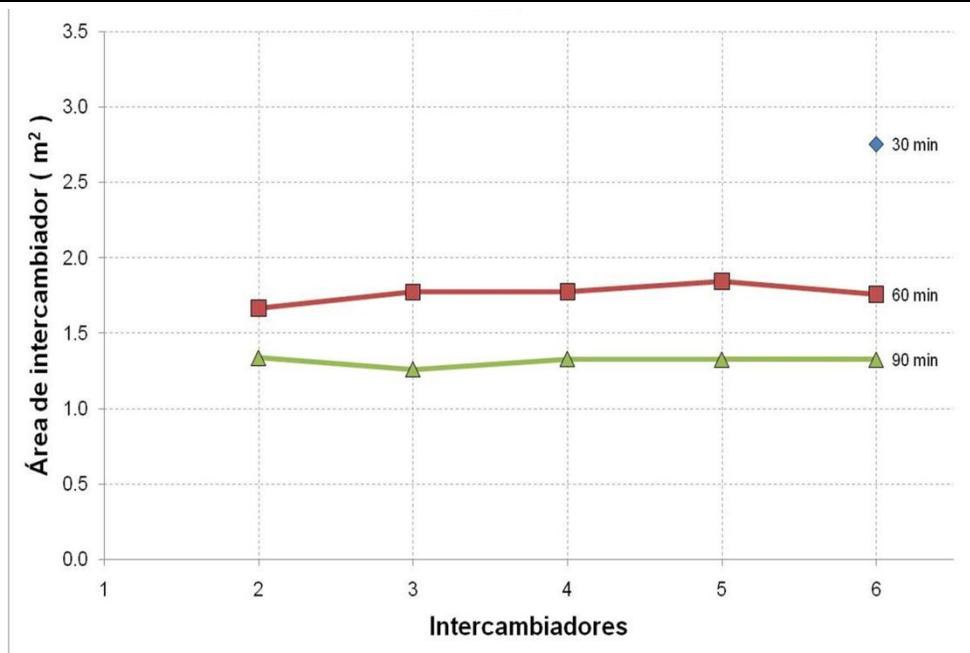


Ilustración 73 Área hx para 2750L. , 30, 60 y 90 min

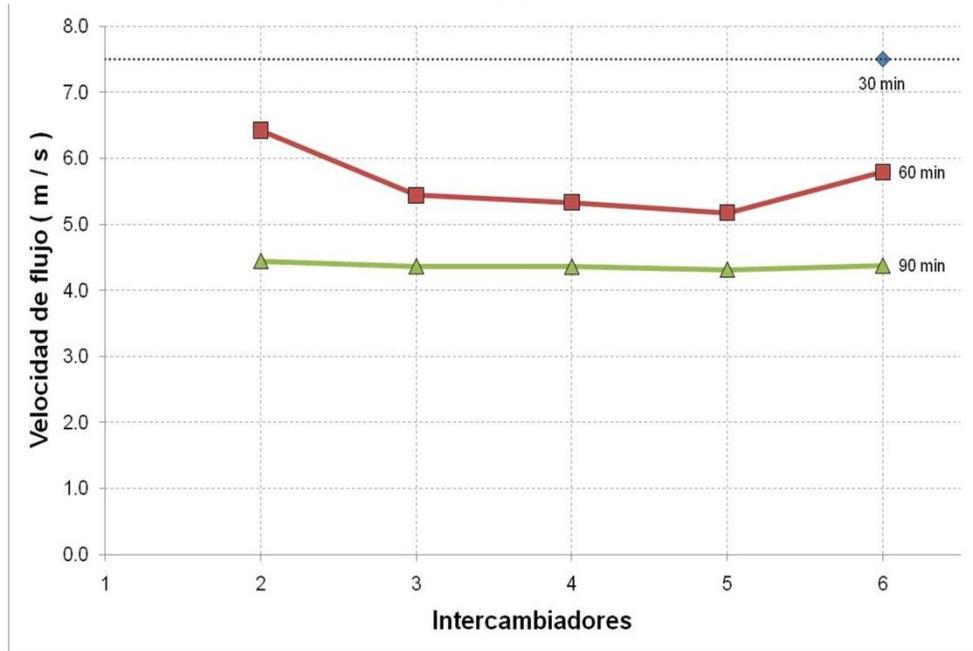


Ilustración 74 Velocidad de leche para 2750L. , 30, 60 y 90 min

3000 litros

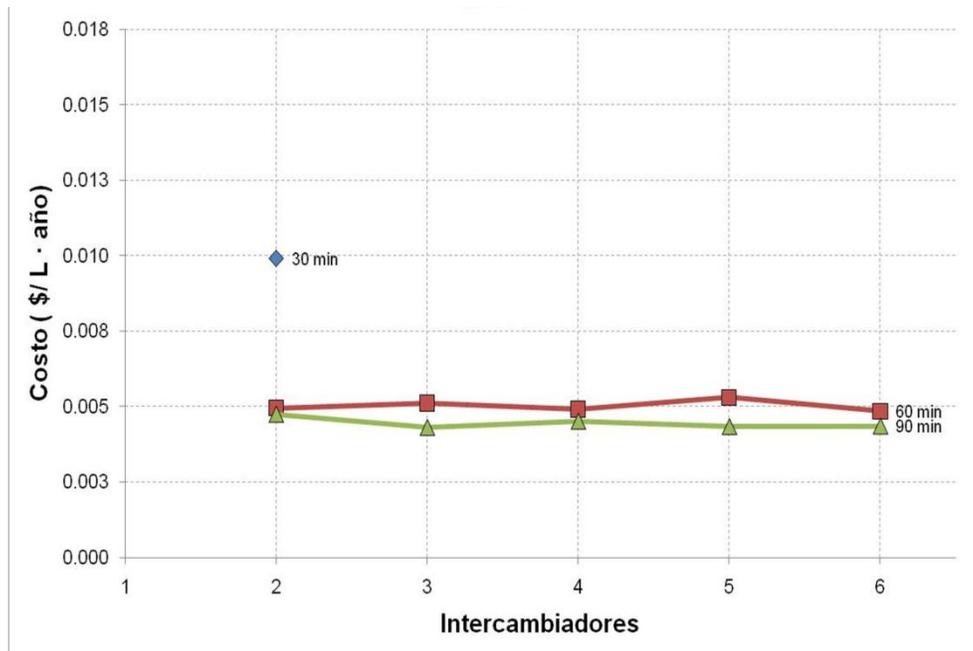


Ilustración 75 Costos para 3000L. , 30, 60 y 90 min.

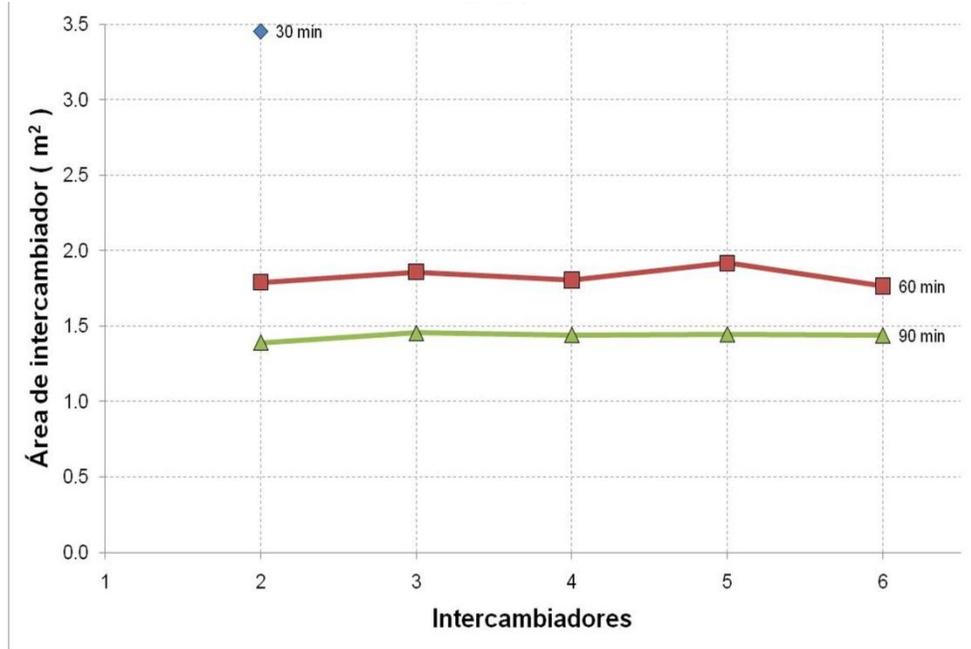


Ilustración 76 Área hx para 3000L. , 30, 60 y 90 min

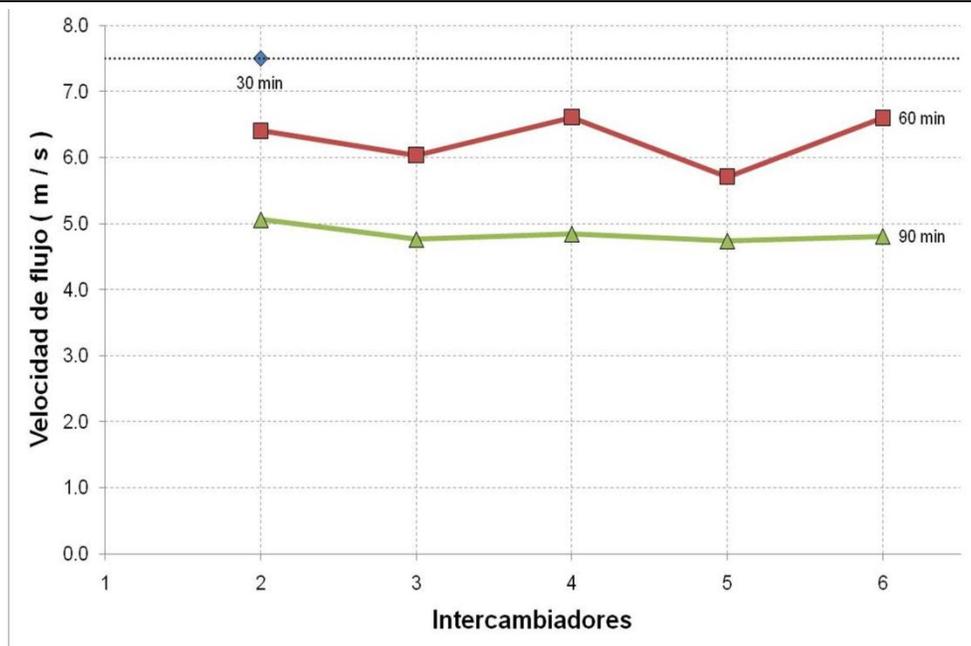


Ilustración 77 Velocidad de leche para 3000L. , 30, 60 y 90 min

Mínimos

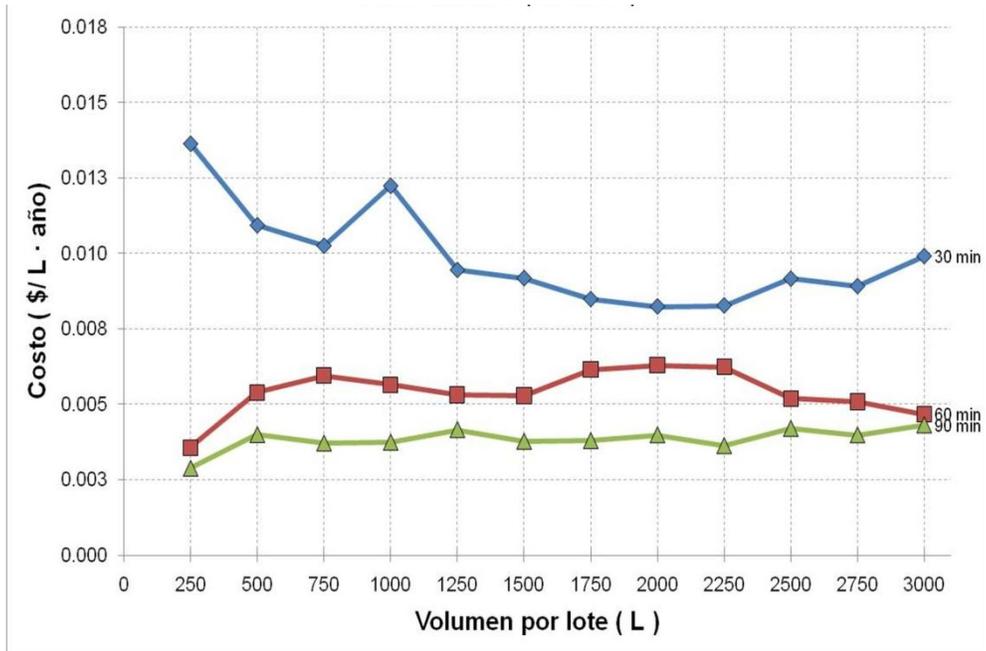


Ilustración 78 Costos unitarios mínimos

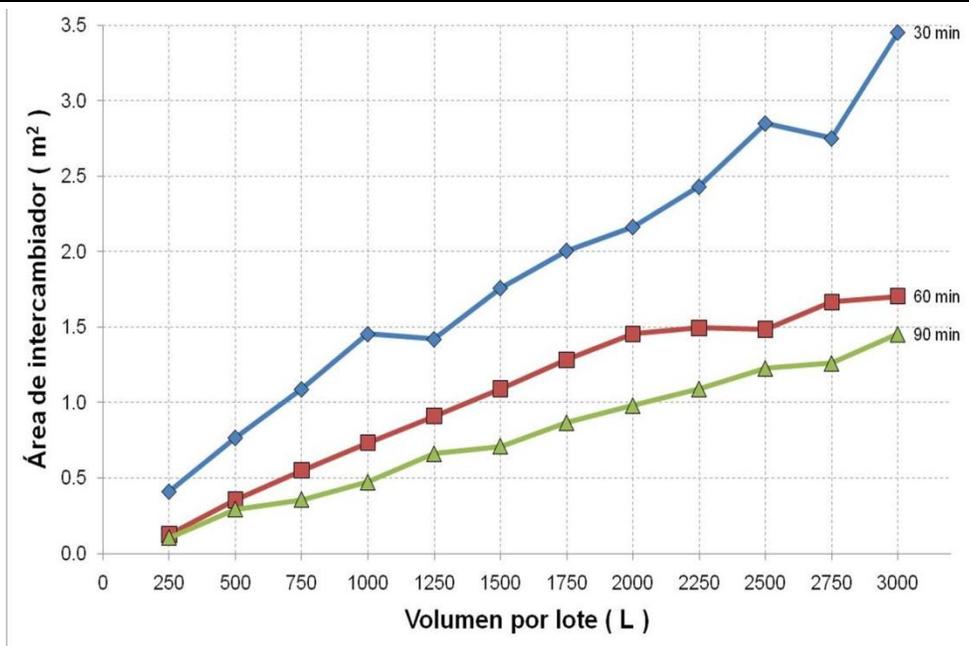


Ilustración 79 Áreas de transferencia de mínimos

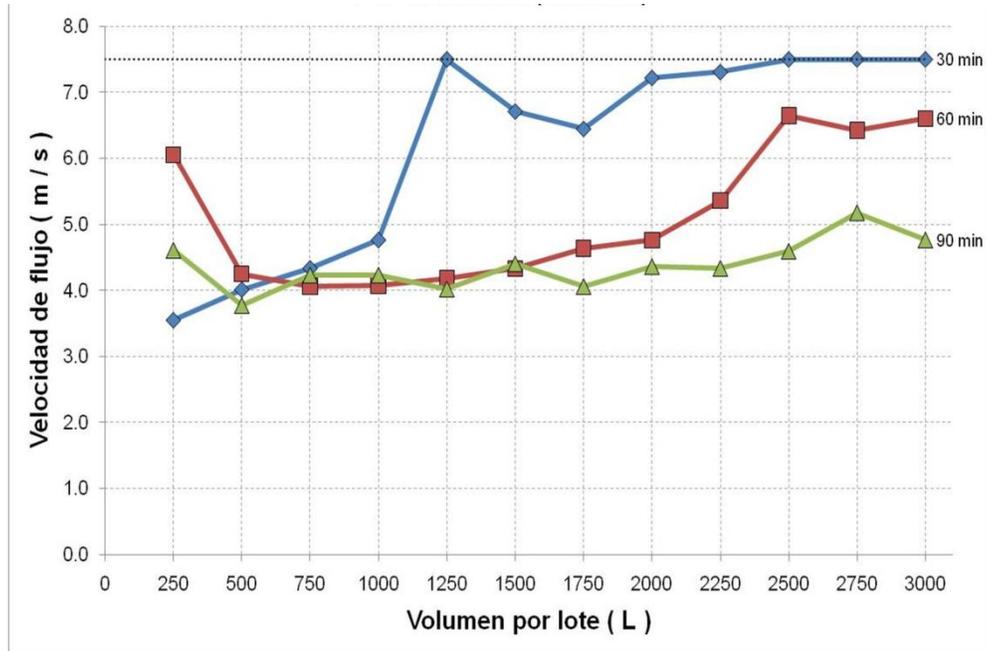
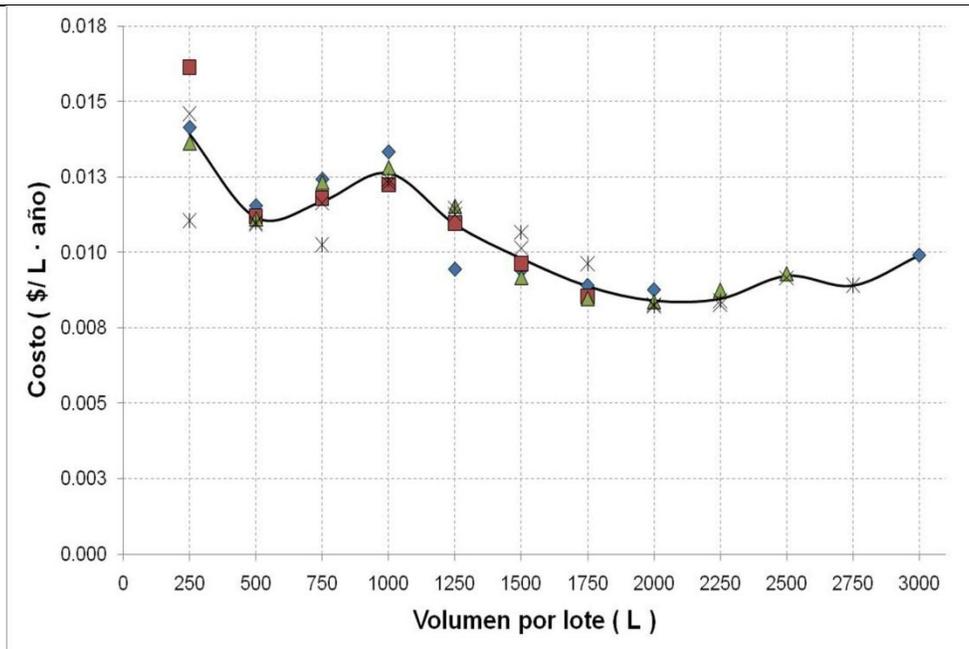
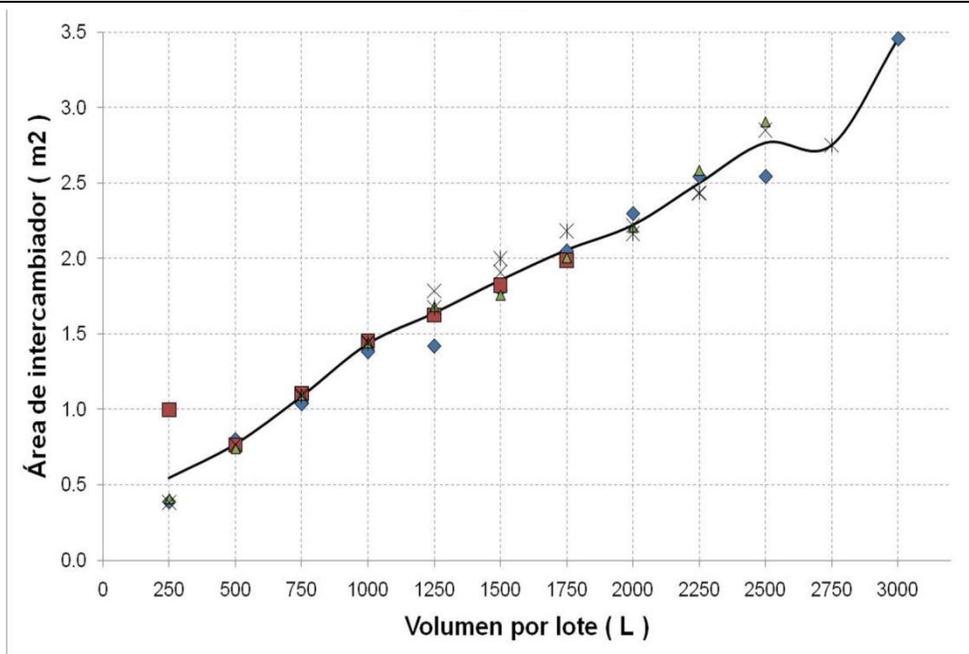


Ilustración 80 Velocidades de flujo de mínimos

Por intercambiadores de calor
30 minutos



**Ilustración 81 Costos mínimos por nº de intercambiadores de calor
30 min.**



**Ilustración 82 Áreas de mínimos por nº de intercambiadores de calor
30 min.**

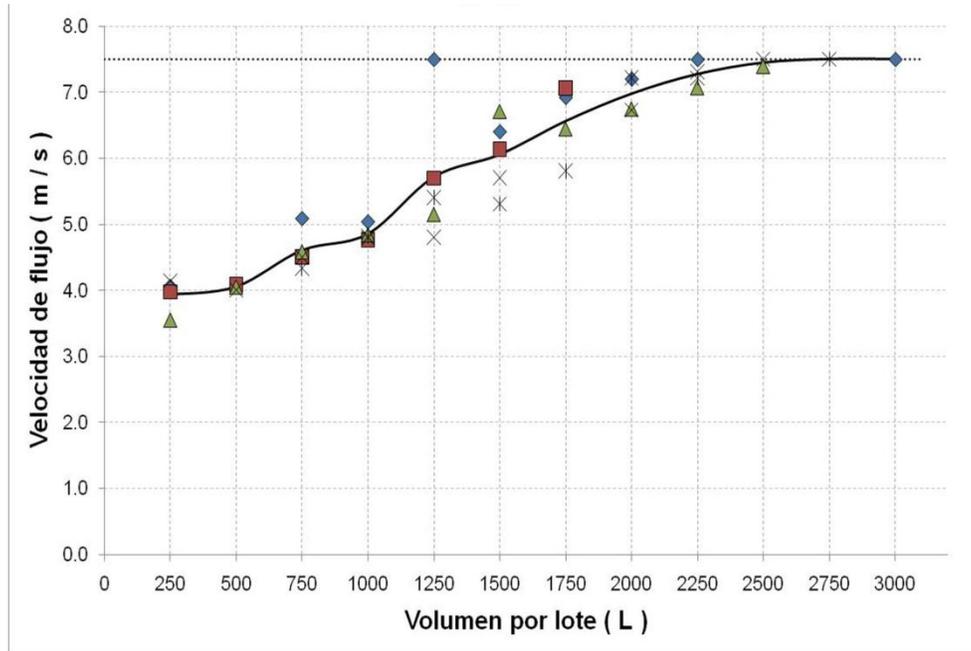


Ilustración 83 Velocidad de flujo de mínimos por nº de intercambiadores de calor 30 min.

60 minutos

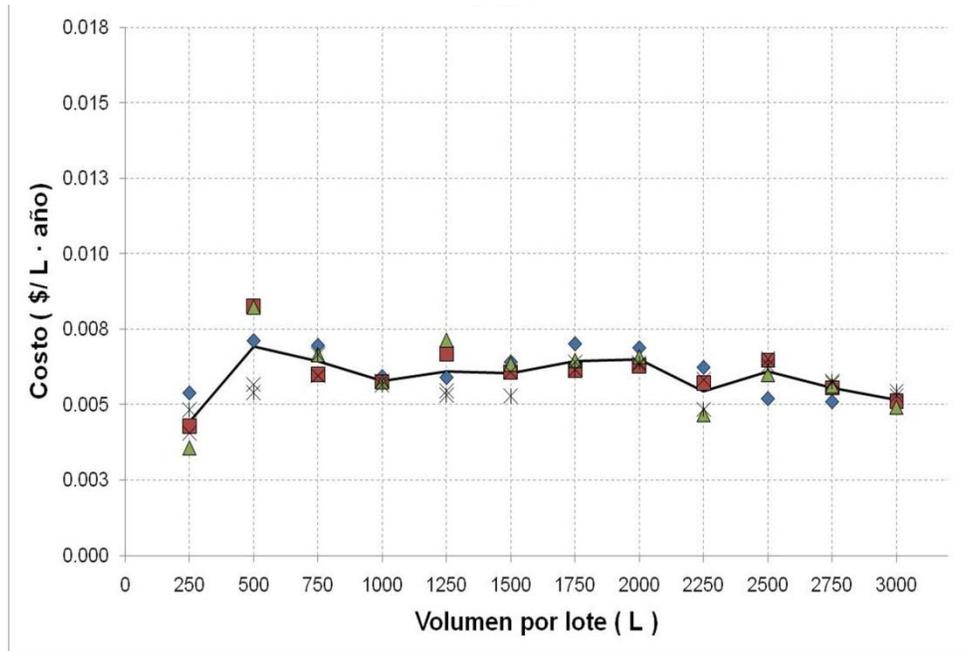


Ilustración 84 Costos mínimos por nº de intercambiadores de calor 60 min.

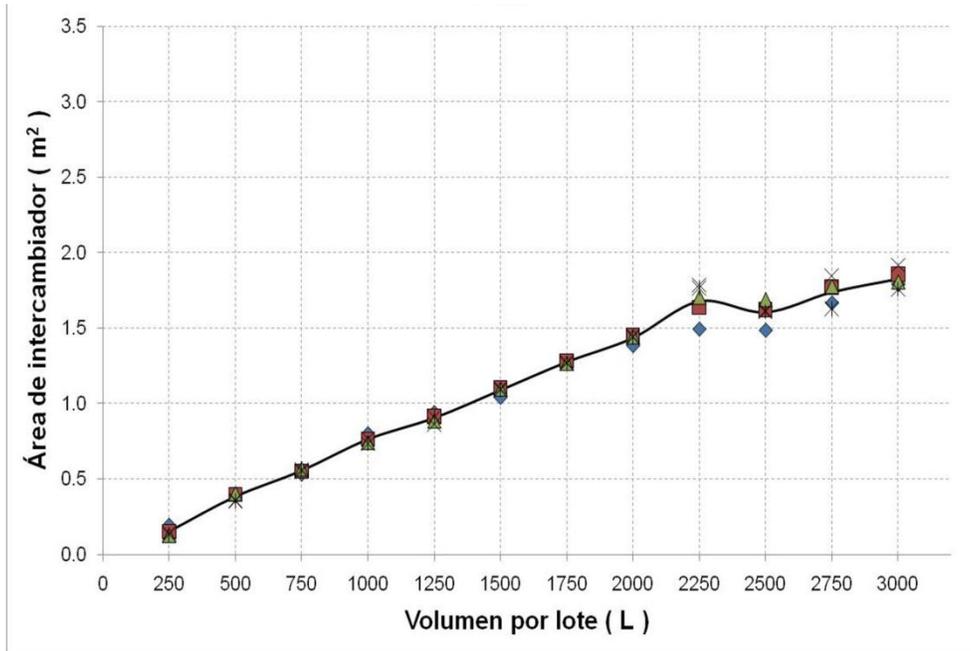


Ilustración 85 Áreas de mínimos por nº de intercambiadores de calor 60 min.

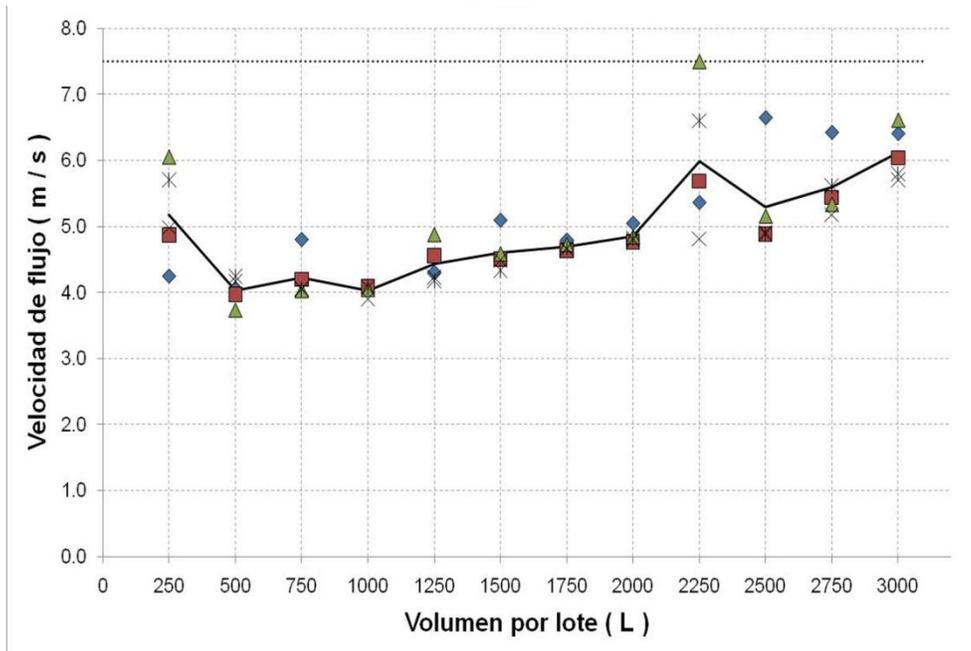


Ilustración 86 Velocidad de flujo de mínimos por nº de intercambiadores de calor 60 min.

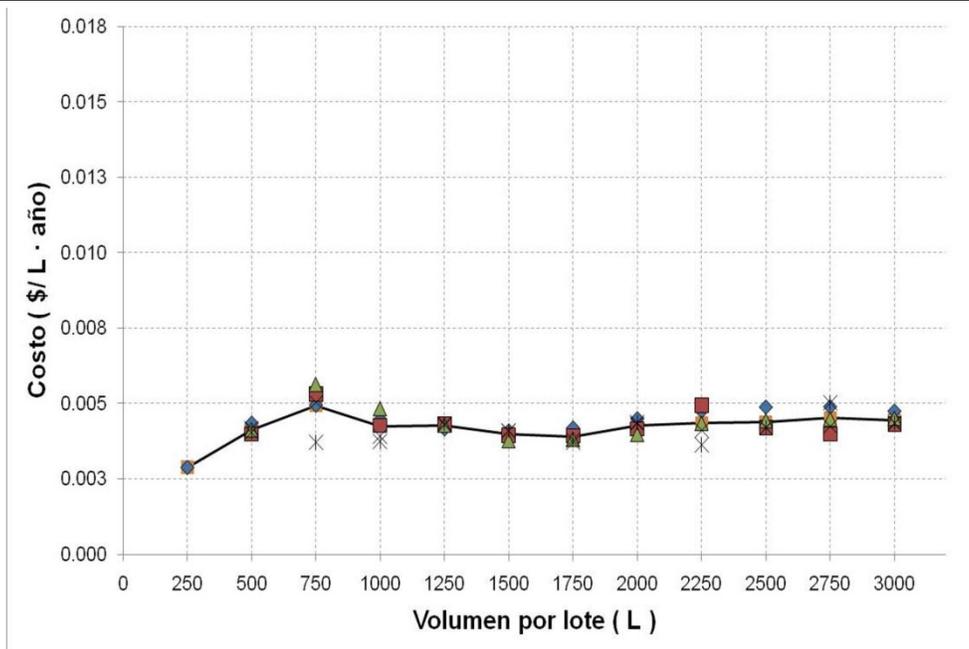


Ilustración 87 Costos mínimos por nº de intercambiadores de calor 90 min.

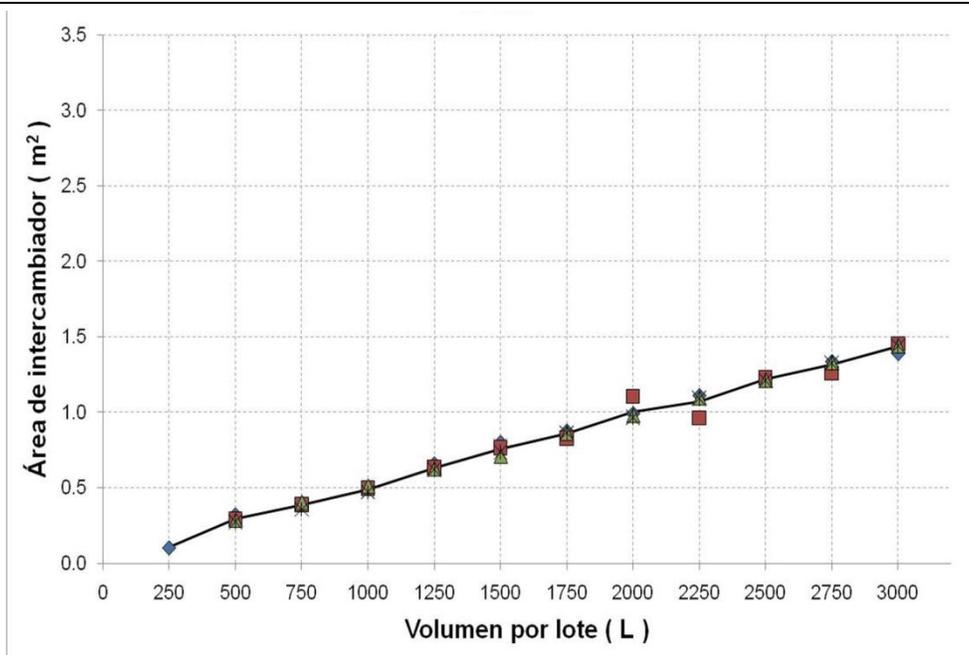


Ilustración 88 Áreas de mínimos por nº de intercambiadores de calor 90 min.

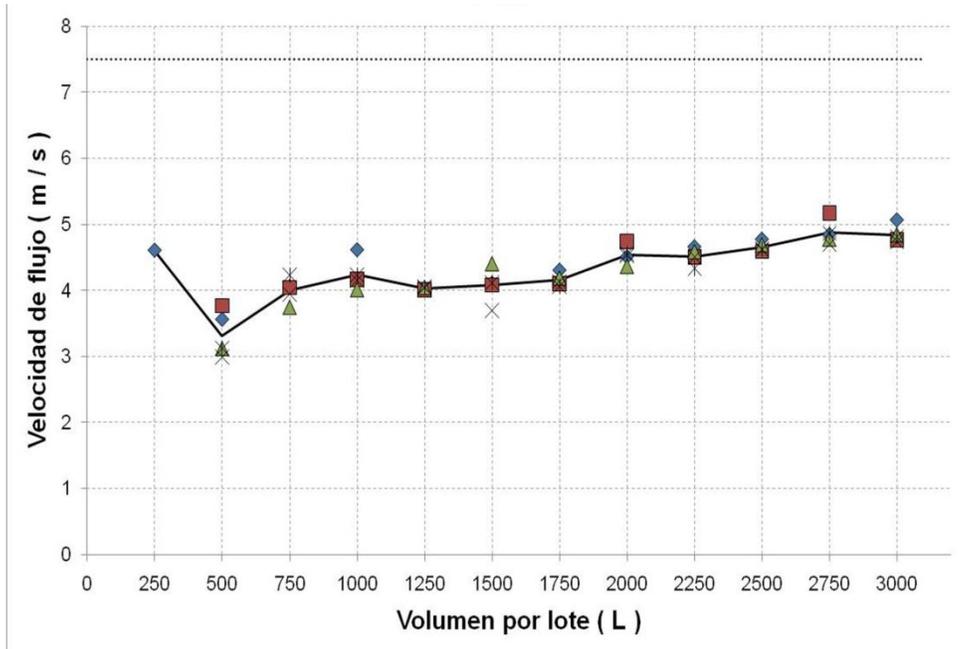


Ilustración 89 Velocidad de flujo de mínimos por nº de intercambiadores de calor 30 min.

Proyección a 1, 2, 3, 4, 5, 10 y 20 años

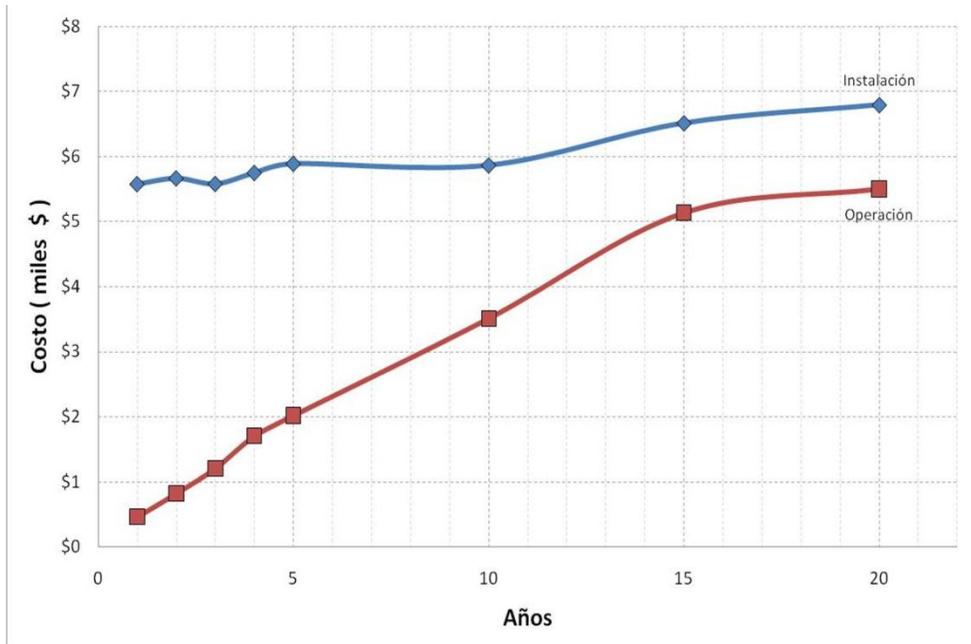


Ilustración 90 Costos a 20 años

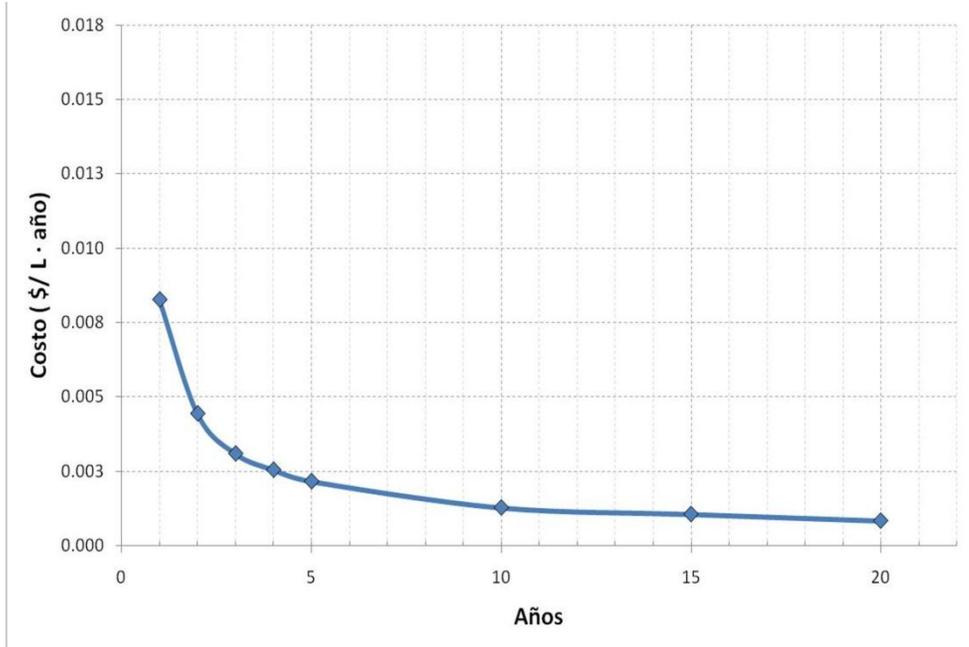


Ilustración 91 Costo unitario a 20 años

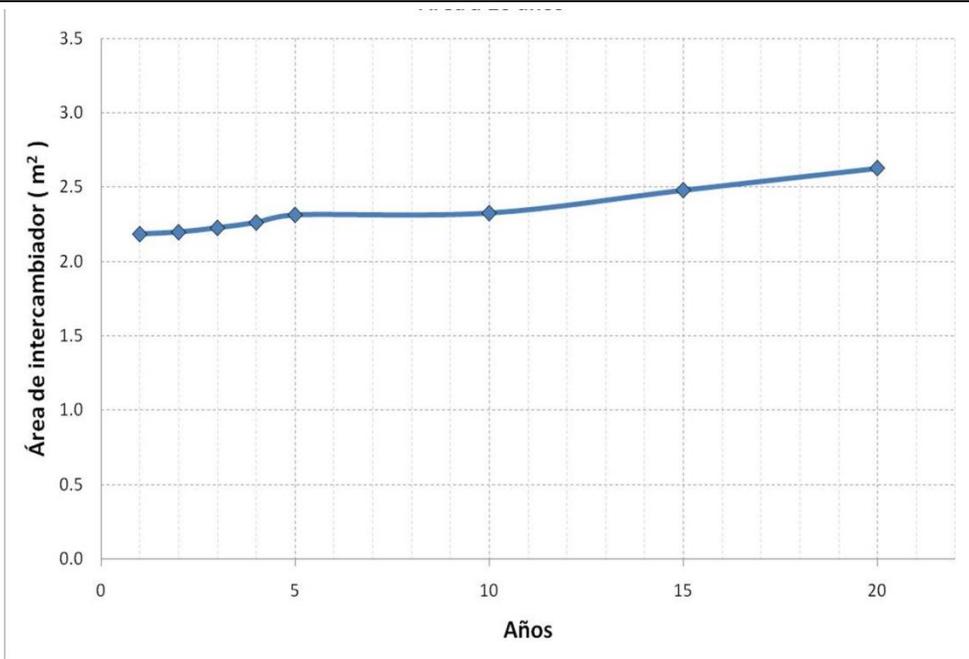


Ilustración 92 Área a 20 años