



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA UNIDAD DE TRANSFERENCIA DE
CALOR DE TUBOS CONCÉNTRICOS A ESCALA PILOTO”**

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

ROJAS MUÑOZ JAVIER ADOLFO

VARELA BARRENO CHRISTOPHER OSWALDO

GUAYAQUIL – ECUADOR

2015

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a mi familia, por ser el soporte de mi vida y a mi novia Ana por haberme inculcado la necesidad de crecer profesionalmente.

A Christopher, mi compañero de tesis, porque sin su dedicación y compromiso no hubiera sido posible este proyecto.

A mi director de tesis, Ing. Carlos Balladares, por impartirnos, con su asesoría y conocimientos, las bases necesarias para llevar a cabo este proyecto.

A mis compañeros de estudio Verónica, Daniel y Roberto, que se convirtieron en grandes amigos luego de incansables jornadas de estudio, por ser una fuente de apoyo incondicional en el cumplimiento de mis metas.

Javier Rojas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la oportunidad que me ha dado de experimentar su amor y providencia a lo largo de mi vida.

Agradezco a mis padres, Pedro y Maury, por el apoyo incondicional y oportuno, por sus enseñanzas de vida, correcciones y consejos, pues estos han forjado mi carácter. Agradezco a mis hermanos Diana, Michael, Jessid y Melanie por compartir conmigo momentos de felicidad y tristeza, por ser mi apoyo e inspiración.

Agradezco a mi compañero del presente Proyecto de Graduación, Adolfo Rojas, por su compromiso y dedicación para la consecución del mismo. Agradezco a mi Tutor, Ing. Carlos Balladares, por su guía y enseñanzas durante la carrera.

Agradezco a mis amigos del DCQA por los momentos compartidos; su apoyo y confianza han sido fundamentales para llegar a la meta.

Christopher Varela

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



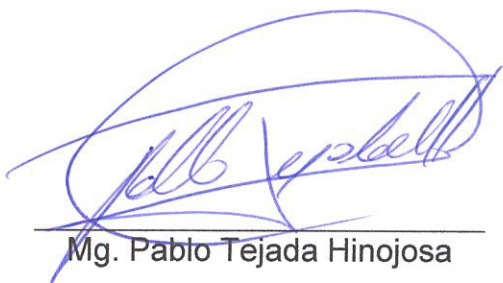
Ing. Oswaldo Valle Sánchez

PRESIDENTE



Ing. Carlos Balladares Grazzo

DIRECTOR



Mg. Pablo Tejada Hinojosa

VOCAL PRINCIPAL



MSc. Jorge Medina Sancho

VOCAL ALTERNO



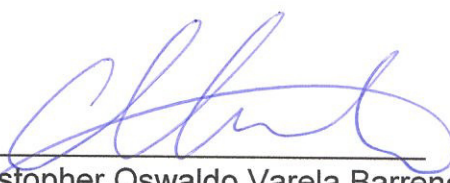
DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Trabajo final de graduación de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Javier Adolfo Rojas Muñoz
C.I.: 0919373878



Christopher Oswaldo Varela Barreno
C.I.: 0930295480



RESUMEN

Este proyecto comprende las etapas de diseño, construcción, puesta en marcha y evaluación de resultados de una Unidad de Transferencia de Calor de Tubos Concéntricos.

El diseño del equipo se elaboró en base a cálculos pertinentes al intercambio de calor, con el objeto de dotar al equipo de un carácter didáctico, y cuyo funcionamiento sea viable en cuanto al uso de los suministros disponibles en el Laboratorio de Operaciones Unitarias como vapor, sistema de enfriamiento, energía eléctrica y espacio disponible.

La construcción se llevó a cabo según los parámetros obtenidos del diseño previamente mencionado; se corroboró que los detalles característicos del proyecto sean debidamente implementados y que el equipo en si no presente ningún tipo de falencia.

El producto terminado del presente Proyecto de Graduación es la Unidad de Transferencia de Calor de Tubos Concéntricos, equipada con instrumentos de medición modernos, que incluyen manómetros, sensores de temperatura y rotámetros; para facilitar el proceso de aprendizaje de los estudiantes de la carrera, y que puede disponer de los siguientes arreglos:

- a) Calentamiento a contracorriente
- b) Enfriamiento en flujo paralelo en arreglo en serie
- c) Enfriamiento en flujo paralelo en arreglo serie - paralelo
- d) Enfriamiento en flujo a contracorriente en arreglo en serie
- e) Enfriamiento en flujo a contracorriente en arreglo serie - paralelo

Se obtuvieron los resultados esperados de acuerdo a los objetivos del proyecto, demostrando en tablas y gráficos cómo el fenómeno de transferencia de calor por convección se cumple experimentalmente y cuyos resultados están íntimamente ligados a las ecuaciones estudiadas a lo largo de nuestra carrera, alcanzando eficiencias que se justifican en términos académicos.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE GRÁFICOS	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE DIAGRAMAS	12
ABREVIATURAS	13
SIMBOLOGÍA.....	15
INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO 1.....	18
1. GENERALIDADES	18
1.1. Antecedentes	18
1.2. Justificación.....	19
1.3. Objetivos	21
1.3.1. Objetivo general	21
1.3.2. Objetivos específicos	21
1.4. Hipótesis.....	22
CAPÍTULO 2.....	24
2. MARCO CONCEPTUAL	24

2.1. Marco Teórico	24
2.1.1. Transferencia de calor	24
2.1.2. Equipos para la transferencia de calor	29
2.1.3. Intercambiadores de calor de doble tubo	31
2.1.4. Cálculo de intercambiadores de calor de doble tubo	33
2.1.5. Diseño de intercambiadores de calor de doble tubo	43
2.2. Metodología.....	46
CAPÍTULO 3.....	51
3. INGENIERIA DEL DISEÑO.....	51
3.1. Datos preliminares del diseño	51
3.2. Determinación de la geometría de la Unidad	52
3.2.1. Sección de Calentamiento.....	52
3.2.2. Sección de Enfriamiento	63
3.2.3. Simulación para varias condiciones de proceso	70
CAPÍTULO 4.....	74
4. INGENIERIA DE DETALLES.....	74
4.1. Selección de materiales y equipos	74
4.2. Proceso de construcción del Equipo.....	77
4.3. Diagrama de Proceso e Instrumentación	87
4.4. Prueba hidráulica de la Unidad de Transferencia de Calor.....	89
4.5. Descripción del sistema electrónico	90
CAPÍTULO 5.....	92

5. ANALISIS DE COSTOS Y COMERCIALIZACION	92
5.1. Preámbulo	92
5.2. Análisis de Costos.....	93
5.3. Justificación de costos	95
5.4. Comercialización	97
CAPÍTULO 6.....	101
6. EVALUACIÓN DE LA UNIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR..	101
6.1. Pruebas experimentales.....	101
PRUEBA 1	104
PRUEBA 2	112
PRUEBA 3	120
PRUEBA 4	128
EVALUACIÓN.....	136
6.2. Manual de operación y mantenimiento	141
CAPÍTULO 7.....	147
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
7.1. Conclusiones	147
7.2. Recomendaciones	149
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
ANEXOS.....	152

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Perfil de temperaturas.	27
<i>Gráfico 2. Varios tipos de intercambiadores y recuperadores de calor.</i>	<i>30</i>
<i>Gráfico 3. Intercambiador de calor de doble tubo.</i>	<i>31</i>
Gráfico 4. Intercambiador de doble tubo en diferentes arreglos.	33
<i>Gráfico 5. Diámetros y localización de coeficientes.</i>	<i>40</i>
<i>Gráfico 6. Localización de coeficientes de transferencia de calor y factores de obstrucción.....</i>	<i>41</i>
Gráfico 7. Dibujo asistido por computadora de la UTC.	77
Gráfico 8. Soldadura / montaje de tubos de acero.....	78
Gráfico 9. Construcción de estructura.....	79
Gráfico 10. Instalación de tubos en estructura.....	80
Gráfico 11. Instalación de líneas de alimentación y accesorios.....	81
Gráfico 12. Instalación de rotámetros.	82
Gráfico 13. Instalación de bomba y sistema eléctrico.	83
Gráfico 14. Instalación de sensores de temperatura.....	84
Gráfico 15. Pruebas hidrostáticas y calibración de instrumentos.....	85
Gráfico 16. Puesta en marcha de la UTC.	86
Gráfico 17. PRUEBA 1: Perfil de temperatura.	110
Gráfico 18. PRUEBA 1: Transferencia de calor.	110
Gráfico 19. PRUEBA 1: Variación de MLDT.	111

Gráfico 20. PRUEBA 1: Eficiencia de la UTC.	111
Gráfico 21. PRUEBA 2: Perfil de temperatura.	118
Gráfico 22. PRUEBA 2: Transferencia de calor.	118
Gráfico 23. PRUEBA 2: Variación de la MLDT.	119
Gráfico 24. PRUEBA 2: Eficiencia de la UTC.	119
Gráfico 25. PRUEBA 3: Perfil de temperatura.	126
Gráfico 26. PRUEBA 3: Transferencia de calor.	126
Gráfico 27. PRUEBA 3: Variación de MLDT.	127
Gráfico 28. PRUEBA 3: Eficiencia de la UTC.	127
Gráfico 29. PRUEBA 4: Perfil de temperatura.	134
Gráfico 30. PRUEBA 4: Transferencia de calor.	134
Gráfico 31. PRUEBA 4: Variación de la MLDT.	135
Gráfico 32. PRUEBA 4: Eficiencia de la UTC.	135
Gráfico 33. Eficiencia del Calentador en cada prueba.	136
Gráfico 34. Eficiencia del Enfriador en cada prueba.	138
Gráfico 35. Eficiencia global del Calentador.	138
Gráfico 36. Eficiencia global del Enfriador.	139
Gráfico 37. Relación de eficiencias en la UTC.	139
Gráfico 38. Posición de válvulas según el arreglo.	146

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Números adimensionales.....</i>	38
Tabla 2. Correlaciones para la transferencia de calor en tubos horizontales.	39
Tabla 3. Especificaciones del caldero.....	53
Tabla 4. Determinación de MLDT de diseño para el Calentador.	57
Tabla 5. Dimensiones de Tubería de Acero IPS.....	59
Tabla 6. Parámetros en distintos arreglos para el Calentador.	62
Tabla 7. Determinación de MLDT de diseño para el Enfriador.	66
<i>Tabla 8. Parámetros en el arreglo seleccionado para el Enfriador.</i>	68
Tabla 9. Resumen de la geometría de Diseño.....	69
Tabla 10. Arreglos para simulaciones.....	70
<i>Tabla 11. Propiedades calculadas para los fluidos.</i>	70
<i>Tabla 12. Simulación para el calentador.</i>	71
<i>Tabla 13. Simulación para el Enfriador.</i>	72
Tabla 14. Descripción de equipos e instrumentos del proceso.....	88
Tabla 15. Costos del proyecto.	94
<i>Tabla 16. Condiciones de operación para las Pruebas Experimentales.</i>	103
Tabla 17. PRUEBA 1: Temperaturas.	104
Tabla 18. PRUEBA 1: Calentador. Características de vapor.	104
Tabla 19. PRUEBA 1: Calentador. Propiedades del fluido de trabajo.....	105
Tabla 20. PRUEBA 1: Calentador. Propiedades del condensado.....	105

Tabla 21. PRUEBA 1: Calentador. Transferencia de Calor.	105
Tabla 22. PRUEBA 1: Calentador. Números adimensionales.	106
Tabla 23. PRUEBA 1: Calentador. Coeficientes de transferencia de calor.	106
Tabla 24. PRUEBA 1: Calentador. Caídas de presión.....	106
Tabla 25. PRUEBA 1: Calentador. Eficiencia.	107
Tabla 26. PRUEBA 1: Enfriador. Propiedades del fluido de trabajo.....	107
Tabla 27. PRUEBA 1: Enfriador. Propiedades del agua de enfriamiento. ..	108
Tabla 28. PRUEBA 1: Enfriador. Transferencia de calor.	108
Tabla 29. PRUEBA 1: Enfriador. Números adimensionales.	108
Tabla 30. PRUEBA 1: Enfriador. Coeficientes de transferencia de calor....	109
Tabla 31. PRUEBA 1: Enfriador. Caídas de presión.....	109
Tabla 32. PRUEBA 1: Enfriador. Eficiencia.	109
Tabla 33. PRUEBA 2: Temperaturas.	112
Tabla 34. PRUEBA 2: Calentador. Características de vapor.	112
Tabla 35. PRUEBA 2: Calentador. Propiedades del fluido de trabajo.....	113
Tabla 36. PRUEBA 2: Calentador. Propiedades del condensado.....	113
Tabla 37. PRUEBA 2: Calentador. Transferencia de calor.	113
Tabla 38. PRUEBA 2: Calentador. Números adimensionales.	114
Tabla 39. PRUEBA 2: Calentador. Coeficientes de transferencia de calor.	114
Tabla 40. PRUEBA 2: Calentador. Caídas de presión.....	114
Tabla 41. PRUEBA 2: Enfriador. Propiedades del fluido de trabajo.....	115
Tabla 42. PRUEBA 2: Enfriador. Propiedades del agua de enfriamiento. ..	115

Tabla 43. PRUEBA 2: Enfriador. Transferencia de calor.	115
Tabla 44. PRUEBA 2: Enfriador. Números adimensionales.	116
Tabla 45. PRUEBA 2: Enfriador. Coeficientes de transferencia de calor.	116
Tabla 46. PRUEBA 2: Enfriador. Caídas de presión.	116
Tabla 47. PRUEBA 2: Calentador. Eficiencia.	117
Tabla 48. PRUEBA 2: Enfriador. Eficiencia.	117
Tabla 49. PRUEBA 3: Temperaturas.	120
Tabla 50. PRUEBA 3: Calentador. Características de vapor.	120
Tabla 51. PRUEBA 3: Calentador. Propiedades del fluido de trabajo.	121
Tabla 52. PRUEBA 3: Calentador. Propiedades del agua de enfriamiento.	121
Tabla 53. PRUEBA 3: Calentador. Transferencia de calor.	121
Tabla 54. PRUEBA 3: Calentador. Números adimensionales.	122
Tabla 55. PRUEBA 3: Calentador. Coeficientes de transferencia de calor.	122
Tabla 56. PRUEBA 3: Calentador. Caídas de presión.	122
Tabla 57. PRUEBA 3: Enfriador. Propiedades del fluido de trabajo.	123
Tabla 58. PRUEBA 3: Enfriador. Propiedades del agua de enfriamiento. ..	123
Tabla 59. PRUEBA 3: Enfriador. Transferencia de calor.	123
Tabla 60. PRUEBA 3: Enfriador. Números adimensionales.	124
Tabla 61. PRUEBA 3: Enfriador. Coeficientes de transferencia de calor.	124
Tabla 61. PRUEBA 3: Enfriador. Caídas de presión.	124
Tabla 63. PRUEBA 3: Calentador. Eficiencia.	125
Tabla 64. PRUEBA 3: Enfriador. Eficiencia.	125

Tabla 65. PRUEBA 4: Temperaturas.	128
Tabla 66. PRUEBA 4: Calentador. Características de vapor.	128
Tabla 67. PRUEBA 4: Calentador. Propiedades del fluido de trabajo.....	129
Tabla 68. PRUEBA 4: Calentador. Propiedades del agua de enfriamiento.	129
Tabla 69. PRUEBA 4: Calentador. Transferencia de calor.	129
Tabla 70. PRUEBA 4: Calentador. Números adimensionales.	130
Tabla 71. PRUEBA 4: Calentador. Coeficientes de transferencia de calor.	130
Tabla 72. PRUEBA 4: Calentador. Caídas de presión.....	130
Tabla 73. PRUEBA 4: Enfriador. Propiedades del fluido de trabajo.....	131
Tabla 74. PRUEBA 4: Enfriador. Propiedades del fluido del agua de enfriamiento.	131
Tabla 75. PRUEBA 4: Enfriador. Transferencia de calor.	131
Tabla 76. PRUEBA 4: Enfriador. Números adimensionales.	132
Tabla 77. PRUEBA 4: Enfriador. Coeficientes de transferencia de calor....	132
Tabla 78. PRUEBA 4: Enfriador. Caídas de presión.....	132
Tabla 79. PRUEBA 4: Calentador. Eficiencia.	133
Tabla 80. PRUEBA 4: Enfriador. Eficiencia.	133
Tabla 81. Evaluación: Temperatura de la pared del tubo en el Calentador.	137
Tabla 82. Evaluación: Coeficientes de transferencia de calor.	140

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

<i>Diagrama 1. FASE I: Ingeniería del Diseño.</i>	48
Diagrama 2. FASE II: Ingeniería de Detalles.	49
<i>Diagrama 3. FASE III. Evaluación.....</i>	50
Diagrama 4. Diseño preliminar del Calentador	63
<i>Diagrama 5. Diseño preliminar del Enfriador.</i>	69
<i>Diagrama 6. Diagrama de Proceso e Instrumentación</i>	87

ABREVIATURAS

UTC	Unidad de Transferencia de Calor
MLDT	Diferencia media logarítmica de temperatura; [°C]
Q	Calor; Flujo de calor; [kJ/h]
T	Temperatura; [°C]
m; m _v	Flujo másico; flujo de vapor; [kg/h], [LPM]
t	Tiempo; [s], [min], [h]
A _o	Área de transferencia de calor; [m ²]
D, d	Diámetro exterior; diámetro interior; [mm]
f	Factor de fricción
L	Longitud; [m]
ΔP	Caída de presión; [atm]
λ	Calor latente de vaporización; [kJ/kg]
c _p	Capacidad calórica a presión constante; [kJ/kg°C]
ρ	Densidad absoluta; [kg/m ³]
k	Conductividad térmica; [kJ/kg-m-°C]
μ	Viscosidad dinámica; [kg/m-s]
h	Coeficiente individual de transferencia de calor por convección; [kJ/h-m ² -°C]
U	Coeficiente global de transferencia de calor; [kJ/h-m ² -°C]
Re	Número de Reynolds

Pr	Número de Prandtl
Nu	Número de Nusselt
NTU	Unidades térmicas de transferencia de calor
ε	Eficiencia

SIMBOLOGÍA

°C	Grado centígrado
K	Grado kelvin
kg	Kilogramo
kJ	Kilojulio
m	Metro
mm	Milímetro
h	Hora
min	Minuto
LPM	Litro por minuto
atm	atmósferas de presión
PI	Indicador de presión manométrica
FI	Indicador de flujo volumétrico
TT	Transmisor de temperatura

INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de implementar nuevos equipos para la realización de prácticas académicas por parte de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, se decidió diseñar y construir una unidad de transferencia de calor con carácter funcional, versátil y didáctico, para que los estudiantes tengan la posibilidad de realizar adecuadamente sus prácticas de transferencia de calor y adquieran experiencia en el manejo de equipos industriales.

La unidad está compuesta por dos secciones: una primera sección en la que se lleva a cabo el calentamiento del fluido de trabajo y la segunda, dedicada al enfriamiento de dicho fluido.

Se decidió utilizar los fluidos existentes en el laboratorio: vapor producido por el caldero como fluido caliente, agua proveniente de la torre de enfriamiento como fluido frío y agua de la red pública como fluido de trabajo. Con el propósito de no interferir con el funcionamiento simultáneo de otros equipos del laboratorio, se diseñó el equipo considerando un consumo de un tercio de la generación de vapor del caldero. Dado que el caldero es de 15 BHP, la producción de vapor es de 235 kg vapor por hora. Se considera solo un tercio de la generación para permitir que el vapor restante sea utilizado en lo que se

requiera al momento y permita el funcionamiento de los equipos actuales o los que se implementen en el futuro.

Para lograr una apreciación didáctica de los fenómenos de transferencia de calor, se estableció una variación de temperatura mínima de 10°C por cada sección, respecto al fluido de trabajo. Un delta de temperatura menor no es adecuado ya que los equipos de medición pueden poseer un error de hasta 3. Por otra parte, un delta de temperatura mayor sería más complicado de conseguir debido a la demanda energética para los altos caudales que se desean manejar.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

El Laboratorio de Operaciones Unitarias cuenta con una serie de equipos a escala piloto para las prácticas de los estudiantes de la carrera, sin embargo, su estado se encuentra deteriorado por el paso del tiempo y carecen de tecnología como: instrumentos de medición modernos, sensores electrónicos y controles automáticos. El mal estado o desactualización de los equipos repercute de manera significativa en la formación de los estudiantes, puesto que las prácticas de laboratorio, al ser una simulación de las actividades a desarrollar en

la industria, constituyen la base de la formación profesional del ingeniero químico.

Entre los equipos que presentan las limitantes descritas, se encuentra el equipo utilizado en el laboratorio para el estudio de transferencia de calor, consistente en un sistema de dos intercambiadores de tubos y carcasa: un calentador y otro de mayor área, que cumple las funciones de enfriador.

Dado que solo se cuenta con un equipo de este tipo, los estudiantes carecen de variedad de equipos para el estudio de cursos como Transferencia de Calor y Operaciones Unitarias I y por lo tanto, se ven restringidos para realizar comparaciones acerca de su eficiencia o funcionalidad. Además, los instrumentos de medición de variables (temperatura, presión y caudal) no son los más óptimos frente al desarrollo tecnológico de la industria, lo que representa una limitación en el desarrollo profesional de los estudiantes.

1.2. Justificación

Reforzar el área de Transferencia de calor en el Laboratorio de Operaciones Unitarias es fundamental debido a que esta operación

constituye uno de los pilares en la formación de ingenieros químicos. La mayoría de industrias utilizan equipos de transferencia de calor en sus actividades productivas y es necesario que los ingenieros químicos de planta conozcan con exactitud su funcionamiento, sean capaces de solicitar un diseño en específico, evalúen la mejor opción para el flujo de los fluidos y conozcan acerca de la instrumentación y control para el desempeño óptimo del equipo en términos térmicos y mecánicos; el factor de obstrucción térmico y la caída de presión se deben encontrar dentro del rango establecido para que el equipo trabaje adecuadamente.

Construir una unidad de transferencia de calor de tubos concéntricos a escala piloto, permitirá a los docentes disponer de un equipo adicional para realizar las prácticas académicas correspondientes. Además, permitirá establecer comparaciones sobre su eficiencia, funcionamiento, entre otros, con el intercambiador de tubos y carcasa instalado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y, entre la variedad de arreglos propios del equipo.

Por otra parte, los estudiantes tendrán la oportunidad de realizar prácticas con un equipo versátil, que brinde facilidades para observar las variables de operación y por ende permita el estudio integral del

funcionamiento del equipo, a través de la instalación de instrumentación adecuada como: manómetros, sensores de temperatura, medidores de flujo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Dotar al Laboratorio de Operaciones Unitarias del DCQA de un equipo a escala piloto, didáctico y versátil, para el estudio de la transferencia de calor.

1.3.2. Objetivos específicos

- ✓ Diseñar una unidad de transferencia de calor de tubos concéntricos en base a las condiciones de operación del laboratorio: las capacidades del caldero y la torre de enfriamiento, con el fin de que puedan trabajar simultáneamente más de dos equipos demandantes de vapor.
- ✓ Calcular el coeficiente global de transferencia de calor y los coeficientes individuales de película mediante el empleo de las ecuaciones teóricas respectivas.

- ✓ Realizar las simulaciones en un software apropiado para intercambiadores de calor, a efecto de determinar la mejor geometría para el equipo.
- ✓ Construir la unidad de transferencia de calor en acero inoxidable 304 y equiparlo con instrumentos de medición modernos, que permitan determinar con gran exactitud las variables experimentales a medir en las prácticas de laboratorio.
- ✓ Determinar experimentalmente la eficiencia de la unidad de transferencia de calor.
- ✓ Elaborar un manual de operación del equipo, en el que se detalle su uso correcto y las consideraciones a tomar en cuenta durante su funcionamiento.

1.4. Hipótesis

Puede ser llevado a cabo con éxito el diseño, construcción y puesta en marcha de una unidad de transferencia de calor que permita su empleo, con fines educativos, en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de ESPOL.

El coeficiente global de transferencia de calor del Calentador y Enfriador, coincide con el calculado teóricamente, considerando hasta 5% de error.

CAPÍTULO 2

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Transferencia de calor

La transferencia de calor es un fenómeno que acontece cuando existe un gradiente de temperatura en un sistema y permite conocer la cantidad de energía que se está desplazando y la velocidad a la cual se efectúa dicho proceso. Existen 3 formas por las cuales se puede transmitir el calor: conducción, convección y radiación.

Conducción

La conducción se efectúa cuando existe una diferencia de temperatura en un cuerpo por contacto directo, por la vibración de las moléculas, y el calor se desplaza desde la región de mayor temperatura hasta la de menor temperatura. La transferencia de calor por conducción es proporcional al área de transferencia de calor (superficie de contacto) y al gradiente de temperatura por unidad de longitud. Este proceso se encuentra descrito por la Ecuación 1:

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 1})$$

Ecuación de Fourier

El factor de proporcionalidad “k” representa a la conductividad térmica de los materiales, la misma que depende de la presión y temperatura, y se encuentra tabulada en diversas fuentes bibliográficas.

Convección

La transferencia de calor por convección se da cuando un fluido en movimiento entra en contacto con una superficie a mayor temperatura. El movimiento del fluido se realiza de forma natural o induciéndolo mecánicamente, denominándose convección natural y convección forzada, respectivamente. La circulación del fluido es originada

fundamentalmente por la diferencia de densidades existentes entre partículas debido al gradiente de temperatura.

Este proceso se encuentra descrito por la Ecuación 2:

$$q = hA(T_w - T_f) \quad (\text{Ec. 2})$$

Ecuación de Enfriamiento de Newton

El coeficiente convectivo de transferencia de calor “h” depende de la geometría de la superficie del cuerpo, de las propiedades del fluido, de la velocidad y la diferencia de temperaturas. Las temperaturas involucradas en la ecuación, “ T_w ” y “ T_f ”, representan las temperaturas a las cuales se encuentra la superficie exterior del sólido y el promedio de temperatura del fluido, respectivamente.

Cuando dos fluidos a diferentes temperaturas están separados por una superficie, ocurre simultáneamente la transferencia de calor por conducción y convección. La Figura 1.1 muestra el perfil de temperaturas resultante.

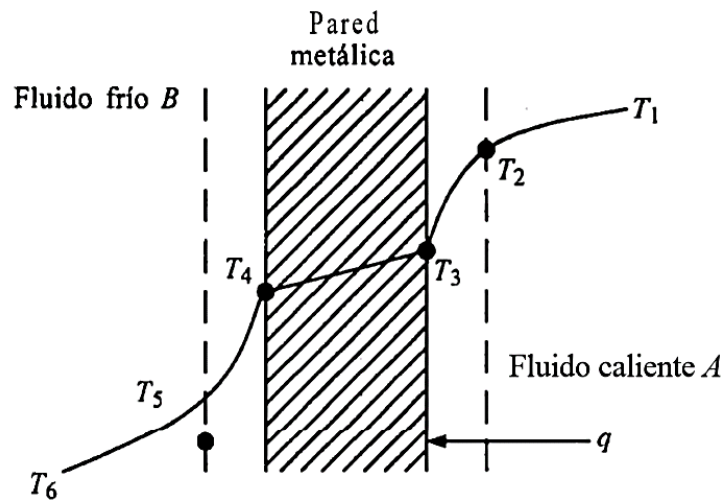


Gráfico 1. Perfil de temperaturas.

Al coeficiente de transferencia de calor por convección, “h”, se le denomina coeficiente de película ya que la mayor oposición al movimiento de energía se encuentra en la película formada en la cercanía de la pared. Debido a esto, el régimen al cual se mueve el fluido influye drásticamente en el coeficiente convectivo.

Radiación

El fenómeno de transferencia de calor por radiación se lleva a cabo sin necesidad de contar con un medio material, como es el caso de la conducción y convección, teniendo como fundamento la emisión y absorción de ondas electromagnéticas en cuerpos cuyas temperaturas difieren.

La radiación térmica se encuentra dentro del espectro electromagnético y se asemeja a los rayos X y ondas de luz, excepto por su longitud de onda, mas su comportamiento es el mismo; tiene la facultad de trasladarse en el espacio y vacío con una trayectoria recta. La transferencia de calor por radiación es extremadamente significativa cuando existe una gran diferencia de temperatura como es el caso de altos hornos. La relación del calor generado está en relación a la temperatura elevada a la cuarta potencia, como muestra la Ecuación 3:

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde la proporción de la ecuación está dada por la constante de Stefan-Boltzman, cuyo valor es $5.676 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$ considerando la idealidad.

La radiación térmica se absorbe, refleja y transmite en los cuerpos. Se denomina cuerpo negro a aquel que tiene la capacidad de absorber la totalidad de la energía radiante sin reflejar porción alguna, pero dicho comportamiento es más bien teórico ya que en la práctica no hay cuerpo que cumpla con esas características. La capacidad para absorber radiación se denomina absorbancia mientras que la relación de la capacidad para emitir radiación entre una superficie determinada y un cuerpo negro se denomina emisividad.

2.1.2. Equipos para la transferencia de calor

En la mayoría de procesos industriales se utilizan equipos de intercambio de calor para acondicionar a los fluidos y calentarlos o enfriarlos hasta la temperatura requerida para su procesamiento, transporte o almacenamiento.

En la práctica se utilizan equipos que permitan el intercambio de calor entre dos fluidos (líquidos, vapores o gases) sin que estos entren en contacto. El fenómeno de transferencia de calor se realiza por convección entre el fluido caliente y la pared de la superficie que los separa, luego el calor se conduce a través del espesor de dicha superficie y, finalmente, se efectúa la transferencia de calor por convección entre la pared y el fluido frío.

En la industria, principalmente petroquímica, las redes de intercambiadores de calor son especialmente importantes debido al ahorro energético, esto es, reducción en el uso de suministros para calentar o enfriar fluidos, ya sea para el transporte, almacenamiento o procesamiento de los hidrocarburos.

El Gráfico 2 muestra la variedad de intercambiadores y recuperadores de calor que existen en la actualidad.

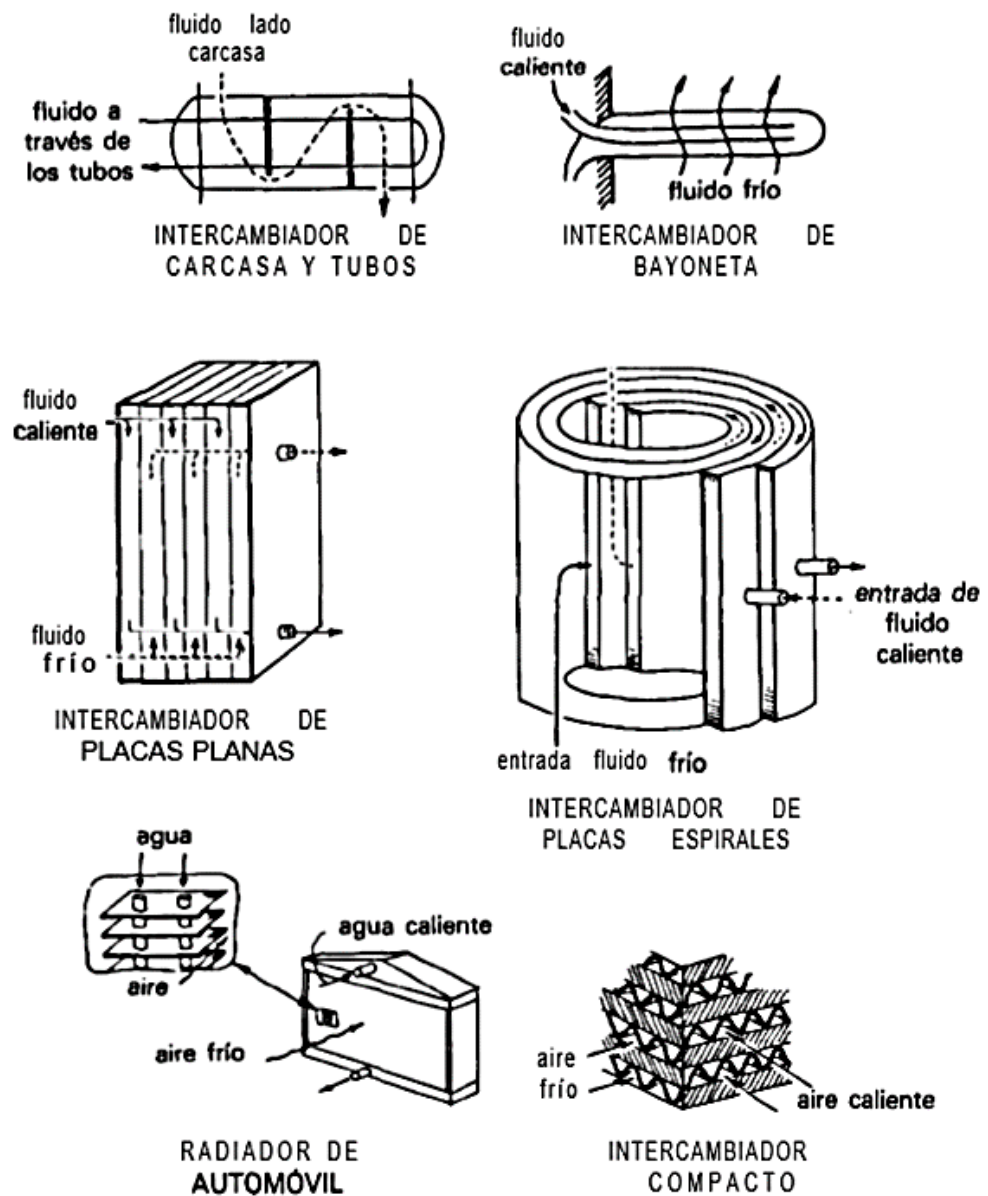


Gráfico 2. Varios tipos de intercambiadores y recuperadores de calor.

2.1.3. Intercambiadores de calor de doble tubo

También llamados intercambiadores de calor de tubos concéntricos, constituyen el tipo más sencillo de estos equipos. Su diseño permite que un fluido circule por el interior de una tubería mientras que el otro fluye por el espacio anular entre los dos tubos y, de esta forma, tengan una superficie de contacto en común sobre la cual se efectúa la transferencia de calor. El Gráfico 3 muestra un esquema general de intercambiadores de doble tubo junto con sus principales partes constituyentes.

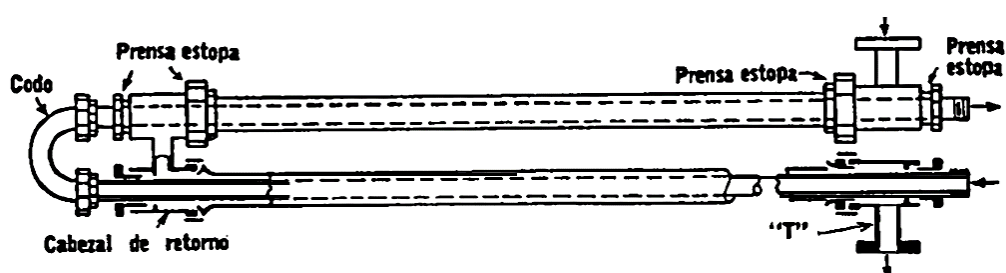


Gráfico 3. Intercambiador de calor de doble tubo.

Entre sus componentes de una sección arreglada en dos pasos, denominada horquilla, tenemos: dos juegos de tubos concéntricos, dos tees conectoras, un cabezal de retorno y un codo en U. La tubería interior se soporta en la exterior mediante estopas y el fluido entra al tubo interior a través de una conexión roscada localizada en la parte externa del intercambiador. Las tees tienen boquillas o conexiones

roscadas que permiten la entrada y salida del fluido del ánulo que cruza de una sección a otra a través del cabezal de retorno. La tubería interior se conecta mediante una conexión en U que está generalmente expuesta y que no proporciona superficie de transferencia de calor.

Este tipo de intercambiadores son relativamente voluminosos, pesados y costosos en función del área de transferencia de calor que otorgan por lo que están limitados generalmente a superficies menores de 500 pies cuadrados. Su ventaja radica en cuanto a la flexibilidad de la disposición de los tubos, además, su fácil ensamblaje permite realizar mantenimiento y limpieza en cualquiera de los dos tubos que los constituyen.

Está concebido para bajas velocidades de flujo en comparación a los de tubo y coraza, pero logran buena distribución de flujos en cada sección y permiten una variedad de arreglos para la circulación de estos. El Gráfico 4 muestran un intercambiador de calor de doble tubo cuyo arreglo está en serie y otro en serie – paralelo.

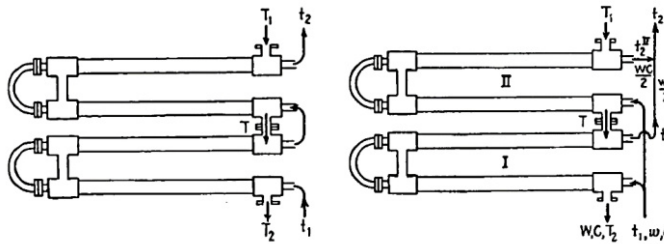


Gráfico 4. Intercambiador de doble tubo en diferentes arreglos.

2.1.4. Cálculo de intercambiadores de calor de doble tubo

Es indispensable en la industria conocer si los equipos son adecuados para las condiciones de proceso. Los intercambiadores de calor deben satisfacer las necesidades térmicas y mecánicas.

Térmicamente el equipo debe remover o suministrar la cantidad de calor necesaria en la superficie con la que cuenta, es decir, calentar o enfriar el fluido en el área de transferencia de calor con la que cuenta el equipo. La Ecuación 4 constituye la expresión fundamental para la transferencia de calor.

$$Q = A_o U_D MLDT \quad (\text{Ec. 4})$$

Ecuación fundamental de transferencia de calor

Donde Q es el flujo de calor, A_o es el área de transferencia de calor, U_D es el coeficiente de diseño de transferencia de calor y $MLDT$ la diferencia media logarítmica de temperatura.

Al ser un fenómeno de transferencia de calor es posible utilizar ecuaciones resultantes del balance de energía del sistema, entre el fluido frío y el fluido caliente.

$$Q_f = Q_c \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\dot{m}_f C p_f \Delta T_f = \dot{m}_c C p_c \Delta T_c \quad (\text{Ec. 6})$$

En caso de existir cambio de fase, específicamente condensación de un vapor saturado, la Ecuación 5 debe despejarse utilizando en el calor latente de vaporización, de la siguiente manera:

$$Q = m \dot{\lambda}_{vap} \quad (\text{Ec. 7})$$

Si el vapor utilizado es sobrecalentado, el calor que se transfiere es de carácter sensible y latente; como se plantea a continuación:

$$Q_T = Q_s + Q_\lambda$$

$$Q_T = m C p \Delta T + m \lambda_{vap}$$

La diferencia logarítmica de temperatura, que es una medida un tanto estadística de la temperatura que existe en el sistema, se halla con la Ecuación 8.

$$MLDT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Siendo ΔT_1 y ΔT_2 los terminales frío y caliente del sistema, respectivamente.

Si el arreglo del equipo de transferencia de calor es del tipo serie-paralelo se debe calcular la diferencia verdadera de temperatura con un factor de corrección, tal como enuncia la Ecuación 9.

$$\Delta t_m = \gamma(T_1 - t_1) \quad (\text{Ec. 9})$$

La diferencia verdadera de temperatura se utiliza en lugar de la diferencia logarítmica de temperatura, MLDT, en la expresión fundamental de la transferencia de calor, Ecuación 4. Este cambio se debe a que el fluido en un arreglo serie – paralelo se divide en dos porciones: una ingresa en un sector más caliente y la otra en uno más frío, lo que origina una variación respecto a la MLDT de un intercambiador que opere en serie.

El factor de corrección γ depende del arreglo del sistema. Las Ecuaciones 10, 11 y 12 sirven para arreglos con una corriente caliente en serie y n corrientes frías en paralelo; mientras que las Ecuaciones 13, 14 y 15 se utilizan cuando hay una corriente fría en serie y n corrientes calientes en paralelo.

$$\frac{1 - P'}{\gamma} = \frac{nR'}{R' - 1} \ln \left[\left(\frac{R' - 1}{R'} \right) \left(\frac{1}{P'} \right)^{\frac{1}{n}} + \frac{1}{R'} \right] \quad (\text{Ec. 10})$$

$$P' = \frac{T_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$R' = \frac{t_1 - T_2}{n(t_2 - t_1)} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\frac{1 - P''}{\gamma} = \frac{n}{1 - R''} \ln \left[(1 - R'') \left(\frac{1}{P''} \right)^{\frac{1}{n}} + R'' \right] \quad (\text{Ec. 13})$$

$$P' = \frac{T_1 - t_2}{T_1 - t_1} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$R' = \frac{n(T_1 - T_2)}{t_2 - t_1} \quad (\text{Ec. 15})$$

El área de transferencia de calor será igual a la superficie de contacto que aporta el tubo que pasa por el interior considerando el número de pasos con los que cuenta el sistema.

$$A_o = n\pi d_o L \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde n es el número de pasos o tubos que tiene el intercambiador, d_o es el diámetro exterior del tubo interior y L es la longitud de cada tubo.

El coeficiente de transferencia de calor, U_D , es calculado utilizando ecuaciones de carácter experimental que fueron demostradas hace decenas de años y son utilizadas en la actualidad. Esto debido a la complejidad del fenómeno de transferencia de calor.

Para determinar dicho coeficiente es necesario conocer las propiedades físicas de los fluidos que intervienen en el sistema ya sea por medio de tablas o utilizando ecuaciones de carácter experimental. Las propiedades son:

- Conductividad térmica (k)
- Capacidad calorífica (c_p)
- Viscosidad dinámica (μ)
- Densidad (ρ)

Debido a que estas varían con la temperatura es necesario determinarlas a una temperatura media entre la entrada y la salida del fluido al sistema.

El siguiente paso es hallar los números de Reynolds, Prandtl y Nusselt, los mismos que se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Números adimensionales.

Fuente: Fundamentos de Transferencia de Calor (Incropera, y otros, 1996)

Número	Definición	Interpretación
Nusselt	$[Nu] = \frac{hL}{k}$ (Ec. 17)	Gradiente de temperatura adimensional en la superficie
Prandtl	$[Pr] = \frac{C_p \mu}{k}$ (Ec. 18)	Razón de las difusividades de momento y térmicas
Reynolds	$[Re] = \frac{GD}{\mu}$ (Ec. 19)	Razón de las fuerzas de inercia y viscosas

Las ecuaciones que rigen los fenómenos de transferencia de calor, como ya se mencionó, son de carácter experimental y por lo tanto existen varios autores. La Tabla 2 muestra varias ecuaciones junto con sus autores y aplicación.

Tabla 2. Correlaciones para la transferencia de calor en tubos horizontales.

Autor	Ecuación	Aplicación	Límite
Sieder y Tate	$[Nu] = 0.027[Re]^{0.8}[Pr]^{1/3} \left(\frac{u}{u_w} \right)^{1.4}$ (Ec. 20)	Enfriamiento / calentamiento	$Re > 10000$ $0.7 < Pr < 16$ 700
Dittus y Boelter	$[Nu] = 0.023[Re]^{0.8}[Pr]^n$ (Ec. 21)	Enfriamiento para $n=0,3$ / Calentamiento para $n=0,4$	$Re > 10000$ $0.7 < Pr < 16$ 0

Estos procesos suelen incluir un cambio de fase. Para determinar el coeficiente de convección en la condensación de vapores se utiliza la Ecuación 21.

$$h = 0.725 \left(\frac{k^3 \rho^2 \lambda g}{\mu D \Delta t} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Ec. 21})$$

Esta expresión se aplica en condensación en tubos horizontales cuando la película se encuentra en régimen laminar, $Re < 3600$.

Para el cálculo de coeficiente de película exterior es necesario hacer uso del diámetro equivalente, D_e , que es equivalente a cuatro veces el radio hidráulico. La Ecuación 22 muestra la expresión final.

$$D_e = \frac{D_i^2 - d_o^2}{d_o} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde d_o representa a la superficie de contacto, es decir, el diámetro exterior del tubo interior y D_i representa al diámetro de la tubería por la cual circula el fluido exterior, es decir, el diámetro interior del tubo exterior.

Es importante identificar la sección por la que circula cada fluido, sea por el interior o por el ánulo, ya que se deben hallar los coeficientes de ambos lados y, posteriormente, calcular el coeficiente interior referido al exterior, como muestra la Ecuación 23.

$$h_{io} = h_i \frac{d_i}{d_o} \quad (\text{Ec. 23})$$

El Gráfico 5 ilustra de manera detallada la localización de los diámetros y coeficientes de película en ambas secciones.

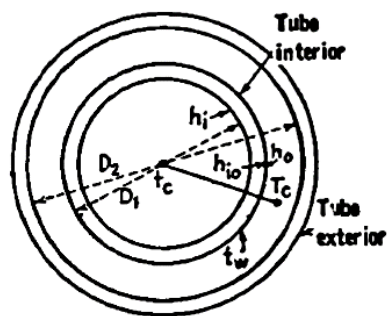


Gráfico 5. Diámetros y localización de coeficientes.

Una vez obtenidos los coeficientes individuales de película se determina un coeficiente global de transferencia de calor, como muestra la Ecuación 24.

$$U_c = \frac{h_{io}h_o}{h_{io} + h_o} \quad (\text{Ec. 24})$$

La expresión anterior representa al coeficiente global de transferencia de calor en condiciones de tubo limpio. A medida que se utilizan los equipos se van depositando incrustaciones en ambas secciones que se traducen como resistencias térmicas y disminuyen el valor de U_c . La Ecuación 25 muestra la influencia de las obstrucciones en el coeficiente global de transferencia de calor.

$$R_d = \frac{1}{U_D} - \frac{1}{U_C} \quad (\text{Ec. 25})$$

El Gráfico 6 ilustra detalladamente la localización de los coeficientes junto con las posibles incrustaciones.

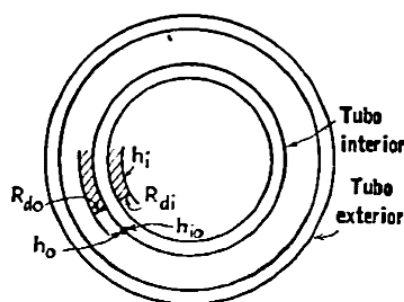


Gráfico 6. Localización de coeficientes de transferencia de calor y factores de obstrucción.

El valor de R_d se lo debe comparar con las medidas permisibles para la incrustación de estos equipos determinadas con la experiencia.

Conocer el coeficiente global de transferencia de calor junto con su factor de obstrucción nos proporciona una medida de juicio para determinar si el equipo satisface las condiciones térmicas del proceso.

Las condiciones mecánicas que debe cumplir el equipo de transferencia de calor se traducen en las caídas de presión que se dan tanto en el interior del tubo como en la sección anular. La Ecuación 26 y 27 muestran la caída de presión para el interior y el ánulo, respectivamente.

$$\Delta P_i = \frac{4fG^2L}{2g\rho^2d_i} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$\Delta P_o = \frac{4fG^2L}{2g\rho^2D_e} \quad (\text{Ec. 27})$$

La f representa al factor de rugosidad de la tubería y puede ser hallada en un diagrama de Moody o utilizando la Ecuación 28, desarrollada por Wilson, McAdams y Seltzer para tubos de hierro y acero comerciales cuyo error es inferior al 10%.

$$f = 0.0035 + \frac{0.264}{[Re]^{0.42}} \quad (\text{Ec. 28})$$

Además, se debe calcular la pérdida por retorno en cada horquilla, para lo cual hacemos uso de la Ecuación 29.

$$\Delta P_r = \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 29})$$

Conociendo las caídas de presión se puede concluir si el equipo satisface las condiciones mecánicas de la operación, determinando previamente un rango permisible para esta pérdida. Por lo general se encuentra entre 5 y 10 psia.

2.1.5. Diseño de intercambiadores de calor de doble tubo

El diseño de un equipo para la transferencia de calor está sujeto a varios factores como:

- Requerimientos térmicos
- Requerimientos mecánicos
- Espacio disponible
- Facilidad de mantenimiento
- Tecnología disponible
- Coste

Los requerimientos térmicos implican la cantidad de calor que se necesita inducir o remover durante la operación junto con el área de transferencia de calor. Esto incluye determinar la cantidad de vapor que genera una caldera o la capacidad de enfriamiento de una torre. Además, se deben conocer profundamente las propiedades de los fluidos del sistema.

Los requerimientos mecánicos están asociados a la caída de presión que puede sufrir el sistema. Esto nos permite establecer el arreglo del intercambiador, es decir, su geometría.

Con ambas premisas se puede determinar las potencias de las bombas a utilizar, diámetros de tuberías de servicios y volúmenes de los depósitos donde se almacenan los fluidos.

El área disponible para la instalación del intercambiador de calor es un punto crítico, ya que generalmente estos equipos requieren del espacio físico adecuado para su buena operación. En base a esto se deciden la disposición de los tubos. Además, este es un buen criterio para determinar si es factible instalar un equipo de doble tubo o, en su defecto, de tubos y coraza.

Es imprescindible establecer el espacio y las condiciones adecuadas para realizar un mantenimiento periódico, caso contrario el equipo irá perdiendo eficiencia a medida que transcurra el tiempo. Los accesorios y tuberías deben ser de fácil desmontaje para facilitar las labores de mantenimiento.

Las válvulas, controles e instrumentos de medición se deben instalara en los sitios adecuados donde los operadores puedan accionarlos y monitorearlos sin dificultad.

Las válvulas y controles pueden ser de manipulación manual, local o remota. Se entiende por manual cuando el operador debe accionar directamente el instrumento, local cuando se dispone de botonera existente en el sitio y, remota cuando se controla desde una sala de operación.

Los instrumentos de medición pueden ser mecánicas, electrónicos o neumáticos, e incluyen:

- Medidores de caudal
- Medidores de temperatura
- Medidores de presión manométrica

El coste del equipo se encuentra influenciado drásticamente por el material sobre el que se construye el equipo. Se recomienda el uso de acero inoxidable para las tuberías, pero también puede ser de hierro, cobre u otras aleaciones. Los instrumentos de medición también aportan significativamente al coste; el nivel tecnológico de los instrumentos junto con su precisión marcará la diferencia.

Se debe realizar un estudio y evaluación del tipo coste – beneficio para tomar la mejor decisión en función de los requerimientos del proceso.

2.2. Metodología

El desarrollo del presente trabajo de titulación contó con las siguientes

Fases:

- Fase I: Ingeniería del Diseño
- Fase II: Ingeniería de Detalles
- Fase III: Evaluación del Equipo

En la Fase I se realizó un estudio acerca de las condiciones sobre las cuales el equipo debe operar, el lugar destinado para su instalación y los recursos necesarios. Se concluyó con el Diseño Final del Equipo.

La Fase II comprende la etapa de selección y adquisición de materiales, construcción e instalación de instrumentos. Mientras que en la Fase III se operó el equipo, se levantó la data y se realizaron las respectivas conclusiones y observaciones. Los Diagramas mostrados a continuación proporcionan información acerca de cada etapa.

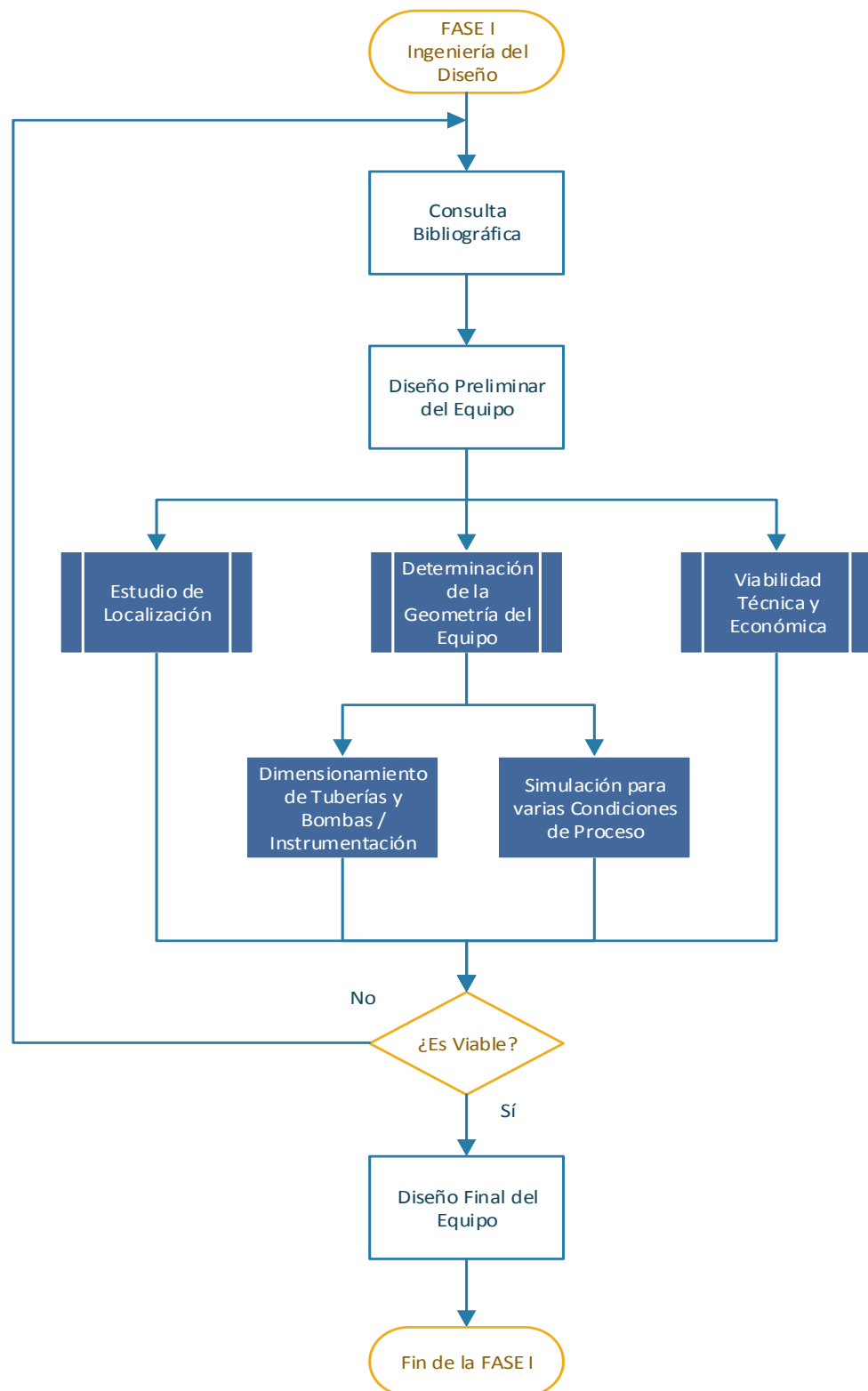


Diagrama 1. FASE I: Ingeniería del Diseño.

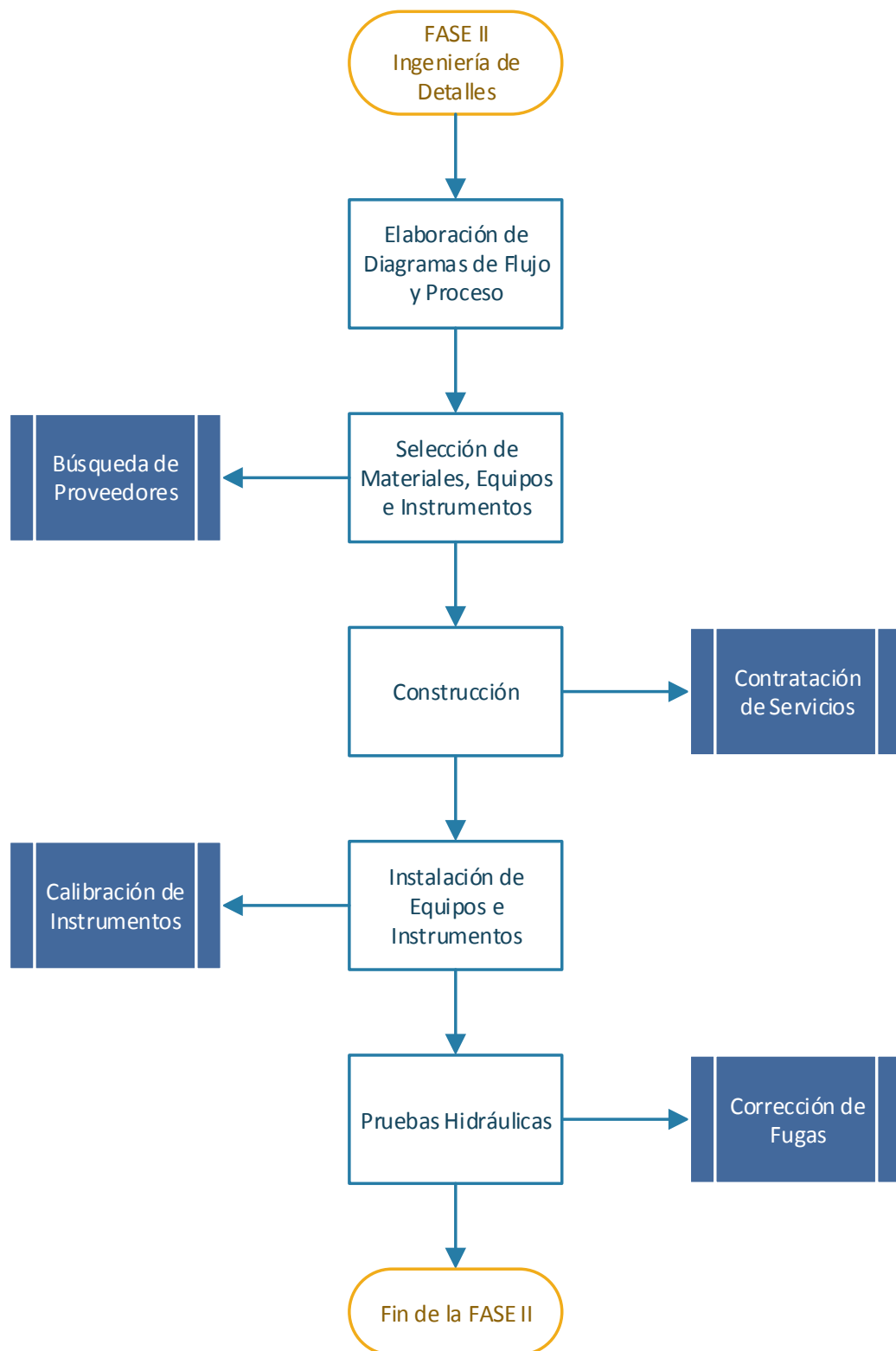


Diagrama 2. FASE II: Ingeniería de Detalles.

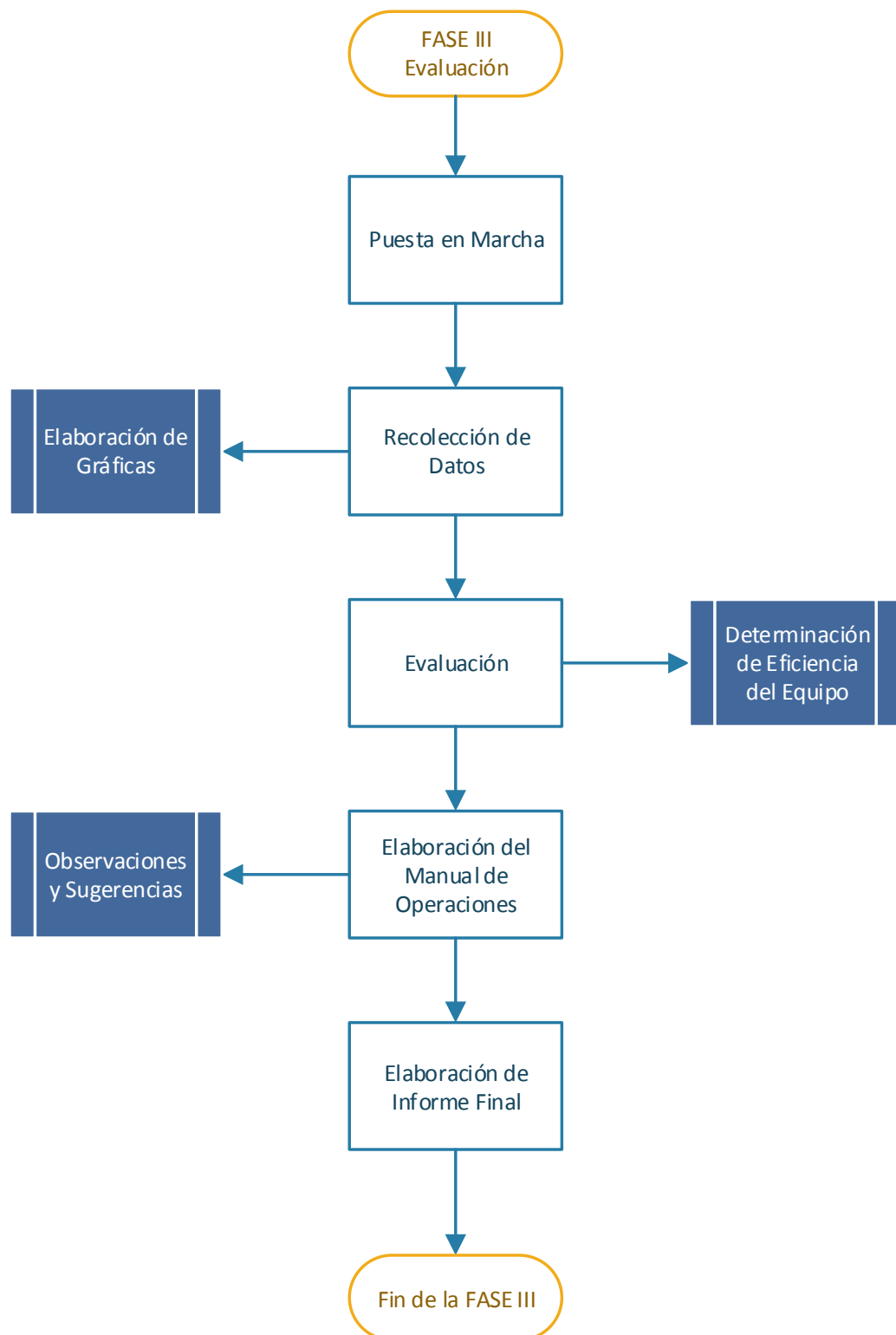


Diagrama 3. FASE III. Evaluación.

CAPÍTULO 3

3. INGENIERIA DEL DISEÑO

3.1. Datos preliminares del diseño

Las premisas para el diseño son las siguientes:

- Diseñar una Unidad de transferencia de calor de doble tubo que incluya una sección de calentamiento y otra de enfriamiento.
- El equipo debe operar con un tercio de la capacidad del caldero para permitir que otros equipos trabajen simultáneamente.

- La diferencia de temperatura en cada sección debe ser de al menos 10 °C para poder apreciar el fenómeno de transferencia de calor.
- El equipo debe ser versátil y didáctico; debe permitir la operación en diferentes arreglos.
- La Unidad de Transferencia de Calor debe estar dotada de instrumentación moderna, para poder medir la temperatura y caudal de manera precisa.
- Su instalación debe efectuarse de tal forma que sea fácil de desmontar y realizar mantenimiento. Sus secciones deben estar unidas con bridas.
- Los tubos y accesorios deben ser de metal y anticorrosivos, de preferencia acero inoxidable 304.
- Se utiliza un factor de diseño de 15% para las tuberías del intercambiador para reducir los efectos vibratorios y proteger la integridad del Equipo.

3.2. Determinación de la geometría de la Unidad

3.2.1. Sección de Calentamiento

El caldero del Laboratorio de Operaciones Unitarias tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 3. Especificaciones del caldero.

Tipo de caldera	Pirotubular vertical
Potencia motor	2,2 Hp
Capacidad	15 BHP
Serial N°	1 ½ SR
Diámetro exterior de tubos	1"
Número de tubos	40
Presión de trabajo	Hasta 100 psi
Presión de operación	35 psi
Tipo de combustible	Diésel
Amperaje	7,7 A
Consumo de combustible (máx. carga)	4,6 gal/h
Voltaje	120 V
Número de pasos	3
Material de los tubos	ASTM A-312-T304L

El caldero del Laboratorio es de 15 BHP, genera vapor saturado, y su capacidad de generación es de:

$$\dot{m}_v = 15 \text{ BHP} * \frac{34,5 \frac{\text{lbs vapor}}{\text{hora}}}{\text{BHP}} * \frac{0,454 \text{ kg}}{\text{lb}}$$

$$\dot{m} = 235 \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}}$$

Utilizando solo un tercio de su capacidad neta de generación, tenemos disponible:

$$\dot{m}_v = \frac{1}{3} * \left(235 \frac{kg \text{ vapor}}{h} \right)$$

$$\dot{m}_v = 78,3 \frac{kg \text{ vapor}}{h}$$

La caldera del Laboratorio de Operaciones Unitarias produce vapor saturado con una calidad que al momento no ha sido determinada y esta, además, fluctúa durante la operación ya que no se encuentra disponible un distribuidor de vapor. Comercialmente las calderas deben generar vapor saturado seco y para efectos de cálculo lo consideramos de la misma manera. Es necesario acotar que la calidad de vapor disminuye a lo largo de las tuberías de abastecimiento debido a la condensación parcial en las paredes de las tuberías, y por esta razón se ha decidido ubicar al Equipo lo más cercano al caldero con el fin de aprovechar todo el calor disponible.

Ciertamente la calidad de vapor tiene un rol importante dentro de la transferencia de calor, ya que sus propiedades como entalpía y volumen específico varían linealmente con esta, sin embargo, el Equipo diseñado, al ser de carácter experimental, no amerita conocer con

exactitud este valor puesto que las diferencias se pueden establecer con el balance de energía respectivo.

Empleando tablas de vapor, tenemos que a 3,4 atm, para vapor saturado seco:

$$T_s = 138,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\lambda_v = 2143 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$V_e = 0,531 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Por lo tanto, la capacidad de diseño de flujo de calor del equipo es de:

$$Q = \dot{m}_v \lambda_v$$

$$Q = \left(78,3 \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}} \right) \left(2143 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$Q = 167796,9 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

En base a este resultado decidimos hacer los cálculos para que el equipo transfiera 200000 kJ/h.

Realizando un balance de calor, mediante la Ecuación 7, obtenemos el flujo de agua necesario para aumentar su temperatura en 10°C según los requerimientos del diseño:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{C_p \Delta T}$$

$$\dot{m} = \frac{200000 \frac{kJ}{h}}{\left(4,18 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}\right) (10 \text{ } ^\circ C)}$$

$$\dot{m} = 4784,7 \frac{kg}{h} \times \frac{l}{kg} \times \frac{h}{60 \text{ min}}$$

$$\dot{m} = 79,7 \text{ LPM}$$

Conociendo ambos flujos másicos y la cantidad de calor, es posible efectuar un diseño tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- El vapor pasará por el ánulo y el agua de la red pública pasará por el interior.
- El calentamiento se efectuará a contracorriente.
- Las dimensiones de las tuberías y el coeficiente de diseño se establecen según tablas colocadas en la sección de Anexos de este documento.

Para calentadores agua – vapor de agua, el coeficiente transferencia de calor de diseño está en el siguiente rango (Kern, 1999):

$$4080 < U_D < 14280$$

Tomando el valor medio de este rango:

$$U_D = 9000 \frac{kJ}{h \text{ m}^2 \text{ } ^\circ C}$$

Empleando la ecuación fundamental de transferencia de calor, Ecuación 4, tenemos:

$$Q = U_D A_o MLDT$$

$$A_o = \frac{Q}{U_D MLDT}$$

$$A_o = \frac{200000 \frac{kJ}{h}}{\left(9000 \frac{kJ}{h m^2 ^\circ C}\right) MLDT}$$

$$A_o = \frac{22,2 m^2 ^\circ C}{MLDT}$$

Para resolver la MLDT se emplea la Ecuación 8 y consideramos varias temperaturas a las cuales deseamos que el equipo opere y obtenemos una media. La Tabla 4 proporciona esta información.

Tabla 4. Determinación de MLDT de diseño para el Calentador.

t1 (°C)	t2 (°C)	Ts (°C)	MLDT (°C)
25	35	126,3	96,2
30	40	126,3	91,2
35	45	126,3	86,2
40	50	126,3	81,2
45	55	126,3	76,2
50	60	126,3	71,2
55	65	126,3	66,2
60	70	126,3	61,2
Promedio			78,7

Con el valor promedio de MLDT determinamos el área de transferencia de calor:

$$A_o = \frac{22,2 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{78,7 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$A_o = 0,282 \text{ m}^2$$

Por otra parte, tomando los extremos de U_D es posible calcular el área mínima y el área máxima de transferencia de calor, siendo su media aritmética $0,4 \text{ m}^2$. Este valor es cercano al cálculo realizado anteriormente de $0,3 \text{ m}^2$, aproximadamente. Los cálculos subsiguientes se realizan utilizando el área calculada inicialmente.

Con esta superficie se determina el diámetro del tubo que pasa por el interior. Se ha decidido que la longitud del tubo será de 3 metros puesto que se comercializan tubos de 6 metros y es necesario formar horquillas. Aunque el calentamiento se realizará en un solo tubo, se desea que la sección de Enfriamiento tenga la misma longitud, por simetría de la Unidad de Transferencia de Calor. Utilizando la Ecuación 16 tenemos que el diámetro requerido es:

$$A_o = n\pi d_o L$$

$$d_o = \frac{A_o}{n\pi L}$$

$$d_0 = \frac{0,282 \text{ m}^2}{\pi(3 \text{ m})} \times \frac{1000 \text{ mm}}{\text{m}}$$

$$d_0 = 29,9 \text{ mm}$$

Agregando un 15% de seguridad para el diseño tenemos que el diámetro exterior de la tubería interior será:

$$d_0 = 1,15 * 29,4 \text{ mm}$$

$$d_0 = 34,4 \text{ mm}$$

La Tabla 5 contiene información acerca de las tuberías que pueden ser útiles para este propósito, brindando el área necesaria.

Tabla 5. Dimensiones de Tubería de Acero IPS.

Fuente: Procesos de Transferencia de Calor (Kern, 1999)

Diámetro nominal (mm)	Diámetro externo (mm)	Cédula	Diámetro interno (mm)	Peso por metro lineal (kg de acero / m)
25,40 (1 pulg)	33,52	40	26,64	2,50
31,75 (1,25 pulg)	42,16	40	35,05	3,40
38,10 (1,50 pulg)	48,26	40	40,89	4,05
50,80 (2 pulg)	58,42	40	52,50	5,45
63,50 (2,5 pulg)	73,15	40	62,71	8,64
76,20 (3 pulg)	88,90	40	77,93	11,29

Tanto las tuberías de 1 y 1,25 pulgadas brindan con el diámetro requerido para el diseño; la elección entre las dos dependerá de la velocidad máxima permitida, el arreglo posible con la tubería exterior y los costos.

Para elegir el diámetro de la tubería exterior se utilizan como referencias: la cantidad de vapor que ingresará en el equipo y las velocidades razonables sobre las cuales circula este último, las mismas que se encuentran entre 20 y 30 m/s según recomienda la División de Ingeniería de CRANE. Esto para evitar la onda sonora que produce el vapor a mayores velocidades; por esta razón tomamos la menor. Con esta información, el área por la cual debe ingresar el vapor es:

$$A = \frac{C}{v}$$

$$A = \frac{\dot{m}V_e}{v}$$

$$A = \frac{\left(78,3 \frac{kg}{h}\right) \left(0,531 \frac{m^3}{kg}\right)}{\left(20 \frac{m}{s} \times \frac{3600 s}{h}\right)}$$

$$A = 5,77 * 10^{-4} m^2$$

Al área calculada agregamos el área que ocupará el tubo que está en el ánulo. Tomamos el área formada por el diámetro exterior de las tuberías de 1 y 1,25 pulgadas.

Para diámetro nominal igual a 1 pulgada:

$$A_{req} = (5,77 * 10^{-4} m^2) + A_{1''}$$

$$A_{req} = (1,73 * 10^{-3} m^2) + \frac{\pi(33,52 * 10^{-3} m)^2}{4}$$

$$A_{req} = 1,46 * 10^{-3} m^2$$

Determinando el diámetro requerido para la tubería exterior tenemos:

$$D_i = \sqrt{\frac{4A_{req}}{\pi}}$$

$$D_i = 43,1 mm$$

Asegurando el diseño se agrega un 15% al diámetro:

$$D_i = 49,6 mm$$

Una tubería de 2 pulgadas cumple con este propósito.

Para diámetro nominal a 1,25 pulgadas, de la misma forma que se realizó el cálculo anterior, tenemos:

$$A_{req} = 1,97 * 10^{-3} m^2$$

$$D_i = 57,6 mm$$

En este caso se requerirá de una tubería de 2,50 de diámetro nominal. Un arreglo sugerido para intercambiadores de doble tubo es uno un cuarto interior – dos y media exterior (Kern, 1999). Sin embargo, antes de tomar una decisión examinamos la influencia en el número de Reynolds en ambos casos, corrigiendo con el diámetro equivalente, usando la Ecuación 22. La Tabla 6 muestra el resumen de este análisis para 84,04 LPM de agua de la red pública y 172,5 lb/h de vapor.

Tabla 6. Parámetros en distintos arreglos para el Calentador.

Parámetros	Arreglo 1 1" – 2"	Arreglo 2 1,25" – 2,5"
Velocidad interior (m/s)	2,51	1,45
Velocidad exterior (m/s)	6,30	5,72
[Re] interior	66894	50849
[Re] exterior	38196	36383

Tanto las velocidades como el número de Reynolds no varían significativamente, manteniendo la turbulencia en el sistema, sin embargo la velocidad en el interior del Arreglo 1 se acerca al límite máximo permisible para sistemas de agua, el cual es de 3 m/s.

Al ser tuberías de tamaño semejante, el costo entre el Arreglo 1 y 2 no varía drásticamente. Un estudio más detallado sobre los costos se encuentra en su capítulo respectivo.

Por las razones expuestas elegimos el Arreglo 2, el cual se encuentra mejor detallado en el Diagrama 4.

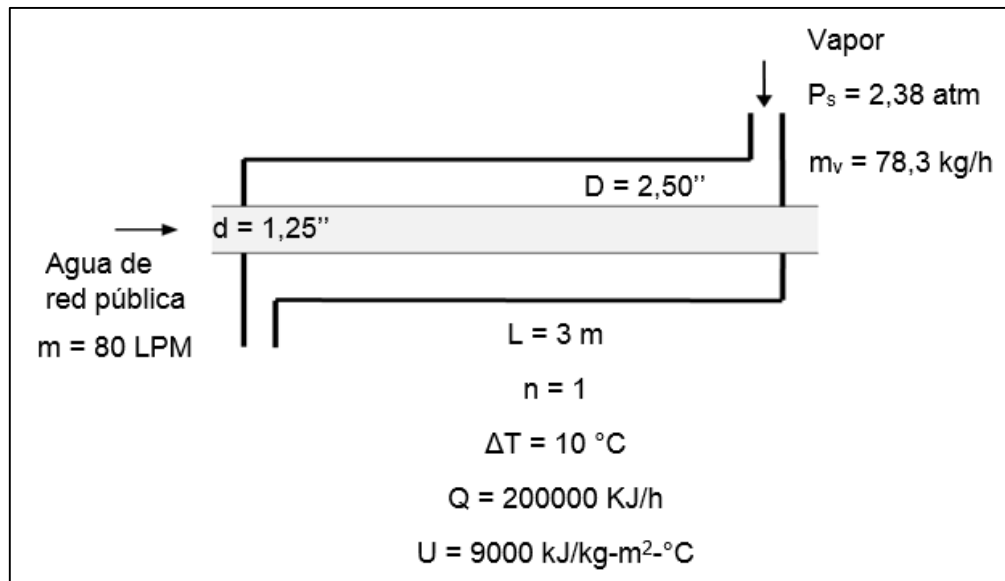


Diagrama 4. Diseño preliminar del Calentador

3.2.2. Sección de Enfriamiento

Para la selección de la geometría del Enfriador se tomaron las siguientes consideraciones:

- El agua de la red pública seguirá pasando por el tubo interior y el agua de enfriamiento pasará por el ánulo.
- Se mantendrá el diámetro de la tubería interior.

- Los tubos tendrán la misma longitud por simetría.
- El Enfriador estará instalado al finalizar la sección de Calentamiento para formar una Unidad de Transferencia de Calor.
- Esta sección debe remover 200000 kJ/h.
- Para fines académicos, la diferencia de temperatura debe ser al menos de 10 °C para el fluido de trabajo.

Iniciamos a partir del balance de energía del sistema, Ecuación 6, para determinar el flujo de agua de enfriamiento.

$$\dot{m}_f C_{p_f} \Delta T_f = \dot{m}_c C_{p_c} \Delta T_c$$

$$\dot{m}_f = \frac{80 \text{ LPM}(10 \text{ }^{\circ}\text{C})}{\Delta T_f}$$

Para determinar la variación de temperatura del agua de enfriamiento hacemos una relación en base a la capacidad de refrigeración de la Torre de Enfriamiento del Laboratorio de Operaciones Unitaria. Esta información se encuentra disponible en la sección de ANEXOS.

$$Q = 30 \text{ TR} \times \frac{12000 \text{ BTU/h}}{\text{TR}} \times \frac{1,05336 \text{ kJ}}{\text{BTU}}$$

$$Q = 379209,6 \frac{kJ}{h}$$

La capacidad de la Torre supera al requerimiento del equipo de 200000 kJ/h. Por la experiencia en las prácticas de laboratorio conocemos que la Torre puede enfriar alrededor de 8 °C. Tomando este delta de temperatura para el equipo, el flujo máximo de diseño de:

$$\dot{m}_f = \frac{80 \text{ LPM}(10 \text{ }^{\circ}\text{C})}{8 \text{ }^{\circ}\text{C}}$$

$$\dot{m}_f = 100 \text{ LPM}$$

Mediante la ecuación fundamental de transferencia de calor, Ecuación 4, determinamos la geometría de esta sección, asumiendo en este caso un U_D de 7500 kJ/h-m²-°C, que es la media del rango de diseño, entre 4840 y 9680 kJ/h-m²-°C. (Kern, 1999)

$$A_o = \frac{26,7 \text{ m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}}{MLDT}$$

Para determinar la MLDT nuevamente realizamos un análisis estadístico y tomamos la media aritmética. La Tabla 7 muestra los resultados.

Tabla 7. Determinación de MLDT de diseño para el Enfriador.

Temperaturas (°C)				MLDT (°C)	
				Paralelo	Contracorriente
T1	T2	t1	t2	5,17	7,61
35	25	20	24	5,88	9,42
40	30	22	29	10,56	12,97
45	35	23	31	14,14	15,98
50	40	25	33	17,48	18,98
55	45	27	35	19,64	20,98
60	50	30	38	22,83	23,99
65	55	32	40	24,93	25,99
70	60	35	43	15,08	16,99
Promedio				16,03	

La geometría resultante para el quipo sería:

$$A_o = \frac{26,7 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{16,03 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$A_o = 1,67 \text{ m}^2$$

Tomando los extremos en el rango de U_D es posible hallar el área mínima y máxima para la transferencia de calor, cuya media aritmética es $1,94 \text{ m}^2$. Este valor es semejante al calculado anteriormente. Para efectos del cálculo mantenemos el valor inicial.

Empleando la Ecuación 16 y tomando el diámetro nominal de tubo interior de 1,25 pulgadas, con 3 metros de longitud, tenemos que el número de pasos necesarios es:

$$n = \frac{A_o}{\pi d_o L}$$

$$n = \frac{1,67 \text{ m}^2}{\pi(42,16 * 10^{-3} \text{ m})(3 \text{ m})}$$

$$n = 4,20$$

Se requieren de 5 tubos de 3 metros para este propósito, quedando por resolver el diámetro del tubo exterior. Este lo decidimos con el mismo criterio del arreglo del Calentador. Para este efecto tomamos una velocidad equivalente a la del fluido que pasa por el interior, la cual fue calculada en la sección anterior y es aproximadamente 1,5 m/s; entonces el diámetro requerido es:

$$A = \frac{C}{v}$$

$$\frac{D_i^2 \pi}{4} = \frac{100 \frac{l}{min} \times \frac{m^3}{1000 l} \times \frac{min}{60 s}}{1,5 \frac{m}{s}}$$

$$D_i = 37,6 \text{ mm}$$

Otorgándole un factor de seguridad para el diseño de 15%:

$$D_i = 43,3 \text{ mm}$$

Para diámetro nominal a 1,25 pulgadas, hablando de la tubería interior, de la misma forma que se realizó el cálculo del Calentador para el tubo exterior, tenemos:

$$A_{req} = 2,05 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$D_i = 58,8 \text{ mm}$$

Esta condición la brinda únicamente una tubería IPS de 2,50 pulgadas, de acuerdo a la Tabla 5. El resultado obtenido es satisfactorio en términos de la simetría de la Unidad de Transferencia de Calor y facilita la instalación de accesorios e instrumentos. Para este arreglo, corrigiendo con el diámetro equivalente, tenemos:

Tabla 8. Parámetros en el arreglo seleccionado para el Enfriador.

Parámetros	Arreglo 1,25'' – 2,5''
Velocidad interior (m/s)	1,38
Velocidad exterior (m/s)	0,81
[Re] interior	48405
[Re] exterior	41495

El Diagrama 5 ilustra el diseño preliminar del Enfriador.

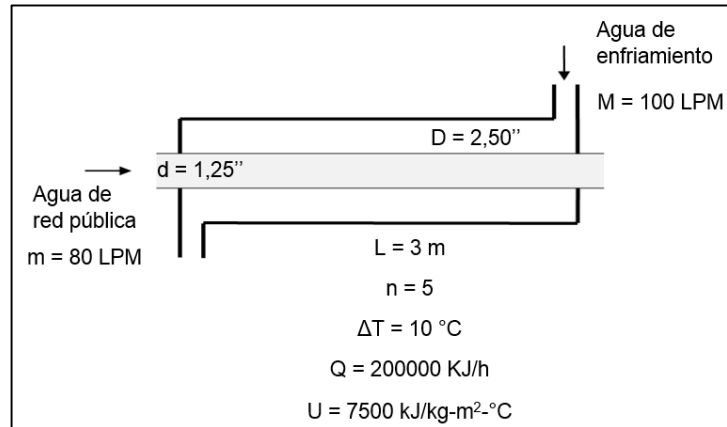


Diagrama 5. Diseño preliminar del Enfriador.

La Tabla 9 muestra el resumen del diseño de la Unidad de Transferencia de Calor.

Tabla 9. Resumen de la geometría de Diseño.

Unidad de Transferencia de Calor		
Dimensión	Calentador	Enfriador
Diámetro de tubería interior (mm)	31,75	31,75
Diámetro de tubería exterior (mm)	63,50	63,50
Longitud efectiva (m)	3	15
Número de pasos	1	5
Área de transferencia de calor (m ²)	0,397	1,99

3.2.3. Simulación para varias condiciones de proceso

Presentamos 4 simulaciones, las cuales detallamos en la Tabla 10.

Tabla 10. Arreglos para simulaciones.

N°	Arreglo		Caudal		
	Calentador	Enfriador	m_{trabajo} (LPM)	m_{vapor} (kg/h)	$M_{\text{fría}}$ (LPM)
1	Contracorriente	Paralelo	20	60	80
2	Contracorriente	Paralelo	50	60	80
3	Contracorriente	Contracorriente	20	60	80
4	Contracorriente	Contracorriente	50	60	80

Las simulaciones fueron realizadas en una hoja de cálculo de Excel, utilizando las ecuaciones expuestas en el Marco Teórico. A continuación se presentan los resultados, Tabla 11, 12 y 13.

La Tabla 11 muestra el cálculo de las propiedades de los fluidos presentes en el sistema, a la temperatura media de trabajo estimada.

Tabla 11. Propiedades calculadas para los fluidos.

Fuente: Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. (Geankoplis, 1998)

Propiedades	Agua (Red P.)	Vapor (2,38 atm)	Agua (Película)	Agua fría (Torre)
T_m (°C)	40	126	104	30
k (kJ/m-h-K)	2,26	0,098	2,45	2,16
C_p (kJ/kg-K)	4,18	1,89	4,23	4,18
ρ (kg/m ³)	994,7	0,56	960	996,4
μ (kg/m-h)	2,36	0,054	1,02	2,88
λ_{vap} (kJ/kg)	-	2188	-	-

La Tabla 12 contiene los resultados en el Calentador.

Tabla 12. Simulación para el calentador.

Simulación	1	2	3	4
Q (kJ/h)	131280	131280	131280	131280
A_o (m ²)	1,31	1,31	1,31	1,31
MLDT (°C)	82	91	82	91
$[Re]_{interior}$	18411	46028	18411	46028
$[Pr]_{interior}$	4,4	4,4	4,4	4,4
$[Nu]_{interior}$	107	223	107	223
$[Re]_{exterior}$	33556	33556	33556	33556
h_{io} (kJ/h-m ² -°C)	5741	11949	5741	11949
h_o (kJ/h-m ² -°C)	30870	30870	30870	30870
U_c (kJ/h-m ² -°C)	4841	8615	4841	8615
U_d (kJ/h-m ² -°C)	1220	1106	1220	1106

Rd (h-m ² -°C/kJ)	0,0006	0,0008	0,0006	0,0008
ΔPi (atm)	0,001	0,001	0,001	0,001
ΔPo (atm)	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabla 13 expone los valores alcanzados en el Enfriador.

Tabla 13. Simulación para el Enfriador.

Simulación	1	2	3	4
Q (kJ/h)	131280	131280	131280	131280
A _o (m ²)	6,55	6,55	6,55	6,55
MLDT (°C)	12	8	17	11
[Re] _{interior}	18411	46028	18411	46028
[Pr] _{interior}	4,4	4,4	4,4	4,4
[Nu] _{interior}	92	192	92	192
[Re] _{exterior}	50334	50334	50334	50334
[Pr] _{exterior}	5,6	5,6	5,6	5,6
[Nu] _{exterior}	264	264	264	264
h _{io} (kJ/h-m ² -°C)	4954	10312	4954	10312
h _o (kJ/h-m ² -°C)	11157	11157	11157	11157
U _c (kJ/h-m ² -°C)	3431	5359	3431	5359
U _d (kJ/h-m ² -°C)	1632	2440	1182	1849
Rd (h-m ² -°C/kJ)	0,0003	0,0002	0,0006	0,0004
ΔPi (atm)	0,001	0,001	0,001	0,001
ΔPo (atm)	0,000	0,000	0,000	0,000

Las 4 simulaciones muestran que el Equipo diseñado cumple satisfactoriamente los requerimientos térmicos y mecánicos para el proceso.

Las caídas de presión son imperceptibles debido al alto caudal que maneja el Equipo en una corta longitud, relativamente. La mayor resistencia está en los retornos de las horquillas, sin embargo, con las ecuaciones teóricas no se llega a un valor apreciable de caídas de presión, tanto en el interior como el exterior. Esto se espera confirmar en la experimentación.

La totalidad de la información que se utilizó para las simulaciones se encuentra en la sección de Anexos del presente documento.

CAPÍTULO 4

4. INGENIERIA DE DETALLES

4.1. Selección de materiales y equipos

Hemos seleccionado acero inoxidable tipo 304, pese a su elevado costo en el mercado, por sus propiedades detalladas en la ficha técnica adjuntada en los anexos. El inoxidable austenítico más popular es el Tipo 304, que contiene básicamente 18% de cromo y 8% de níquel, con un tenor de carbono limitado a un máximo de 0,08%. Para el buen funcionamiento a largo plazo del equipo, es necesario emplear un

material que tenga alta durabilidad y resistencia, que permita precautelar los efectos de los fluidos utilizados en su funcionamiento y de su exposición a agentes del ambiente. El acero, con un factor de conductividad térmica $k^*=26$ [BTU/(H)(PIE²)(F/PIE)], pese a no ser el mejor conductor de calor, es un material cuyo uso resulta totalmente viable en este tipo de proyectos frente a otro tipo de metales como el cobre, el oro o la plata. El cobre siendo un mejor conductor de calor (factor $k^*= 207$ a 224 [BTU/(H)(PIE²)(F/PIE)]), presenta desventajas en cuanto a su durabilidad; mientras que el oro y la plata, materiales durables, resistentes y excelentes transmisores de calor, tienen un costo demasiado elevado.

Los accesorios de medición son un factor importante en el proyecto presentado. Mediante la implementación de sensores de temperatura, el usuario puede visualizar la fluctuación de temperaturas y facilitar el registro de las mismas en todos los pasos, al reflejarse las temperaturas de los nueve puntos del equipo en dos pantallas instaladas en la caja de mando. Adicionalmente, la visualización de datos es un aditamento que sintetiza la labor de medición, y es considerablemente útil en el registro de temperaturas de intercambiadores de calor de tubos concéntricos de gran dimensión con un gran número de puntos. Cabe recalcar que uno de las características especiales del equipo es que

este cuenta con un sensor especial. El mismo que nos permite cuantificar la temperatura de la lámina de condensado, formada en la pared exterior del tubo sometido al calentamiento por el vapor, dato que habitualmente es asumido por los estudiantes para continuar los cálculos respectivos.

Con respecto a la bomba, se consideró como variable de análisis el caudal requerido para el fluido a tratar. En este caso el fluido a tratar es el agua y el caudal requerido es de aproximadamente veintiuno galones por minuto. En el mercado actual del país existe una marca reconocida de bombas la cual nos puede garantizar el caudal requerido, se adquirió la bomba de caudal Pedrollo la cual tiene como referencia un caudal de 10 - 100 litros por minuto, 35 - 19 metros de altura manométrica total funcionando a 110 voltios y 750 vatios o 1 caballo de fuerza. Las curvas de funcionamiento podrán ser verificadas en los anexos.

Los rotámetros implementados fueron especialmente seleccionados para poder suplir la demanda de verificación y control de caudal en nuestro equipo. El cuerpo es de PC como material del cuerpo y ABS para el flotador.

4.2. Proceso de construcción del Equipo

Diseño de la Unidad de Transferencia de Calor.

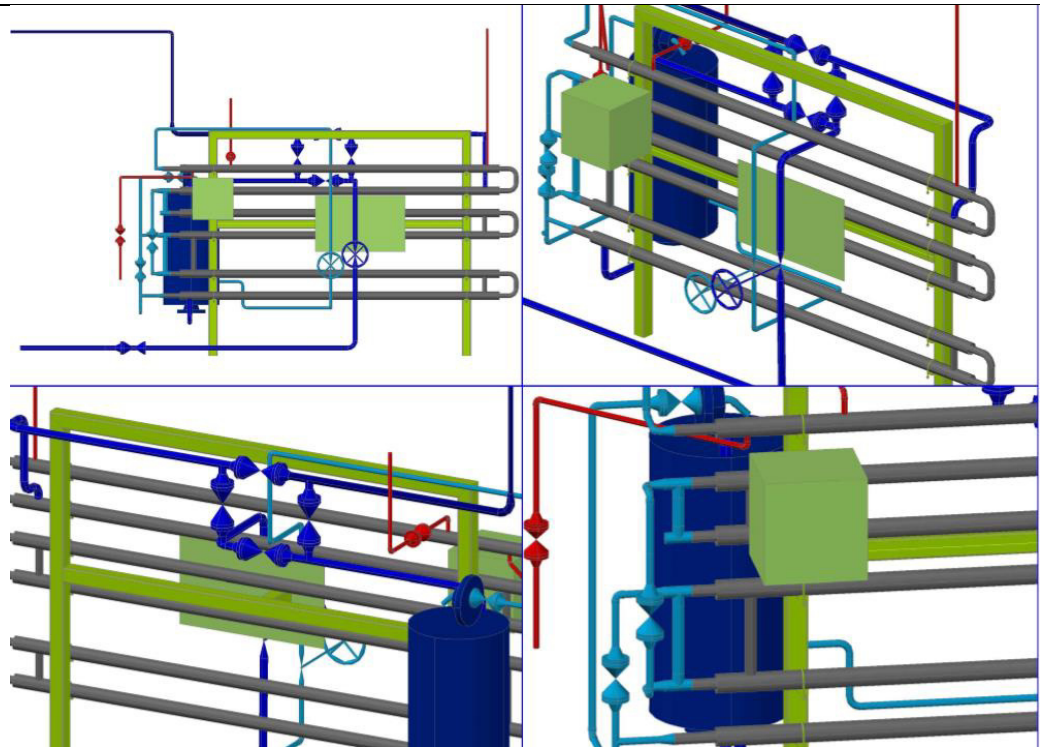


Gráfico 7. Dibujo asistido por computadora de la UTC.

Adquisición de tuberías, codos, bridas y pernos de acero inoxidable 304.

Soldadura 308L de INDURA para tubos en taller mecánico.



Gráfico 8. Soldadura / montaje de tubos de acero.

Construcción y montaje de estructura para tubos, tanque y bomba.



Gráfico 9. Construcción de estructura.

Montaje del Equipo en estructura.



Gráfico 10. Instalación de tubos en estructura.

Adquisición de accesorios e instalación de líneas de alimentación a Tanque de almacenamiento, Torre de Enfriamiento y Línea de Vapor.



Gráfico 11. Instalación de líneas de alimentación y accesorios.

Instalación de Rotámetros y Manómetros en el Equipo.

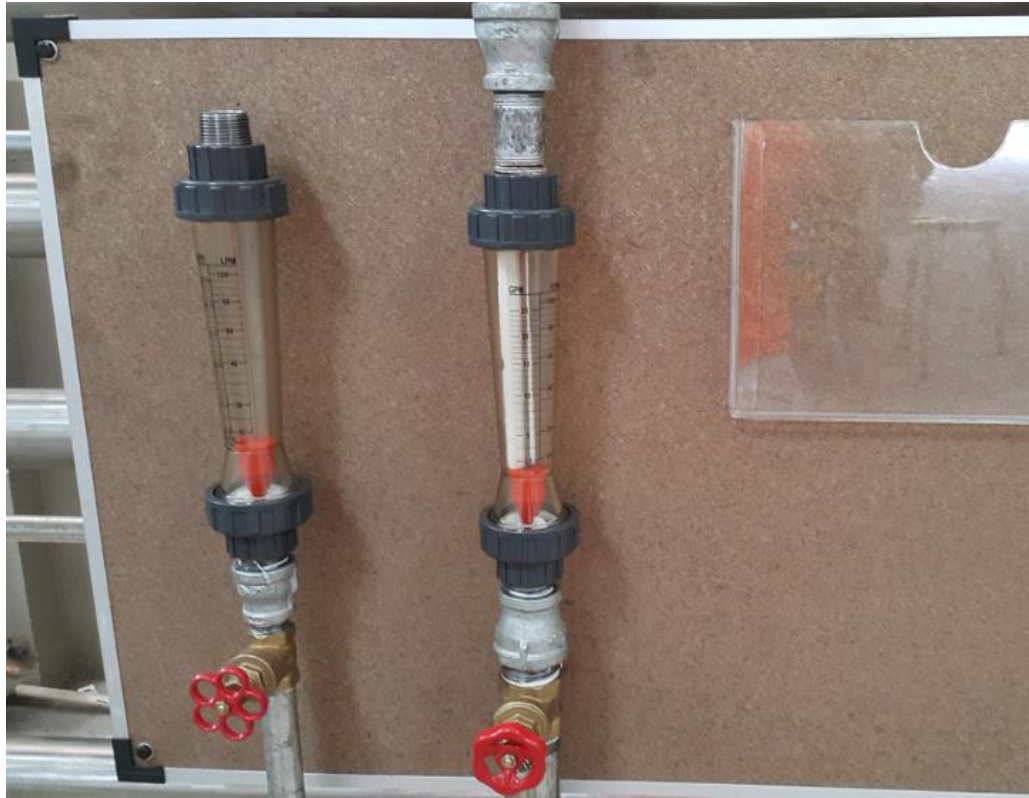


Gráfico 12. Instalación de rotámetros.

Instalación de bomba



Gráfico 13. Instalación de bomba y sistema eléctrico.

Instalación de Sensores de Temperatura y caja de control.

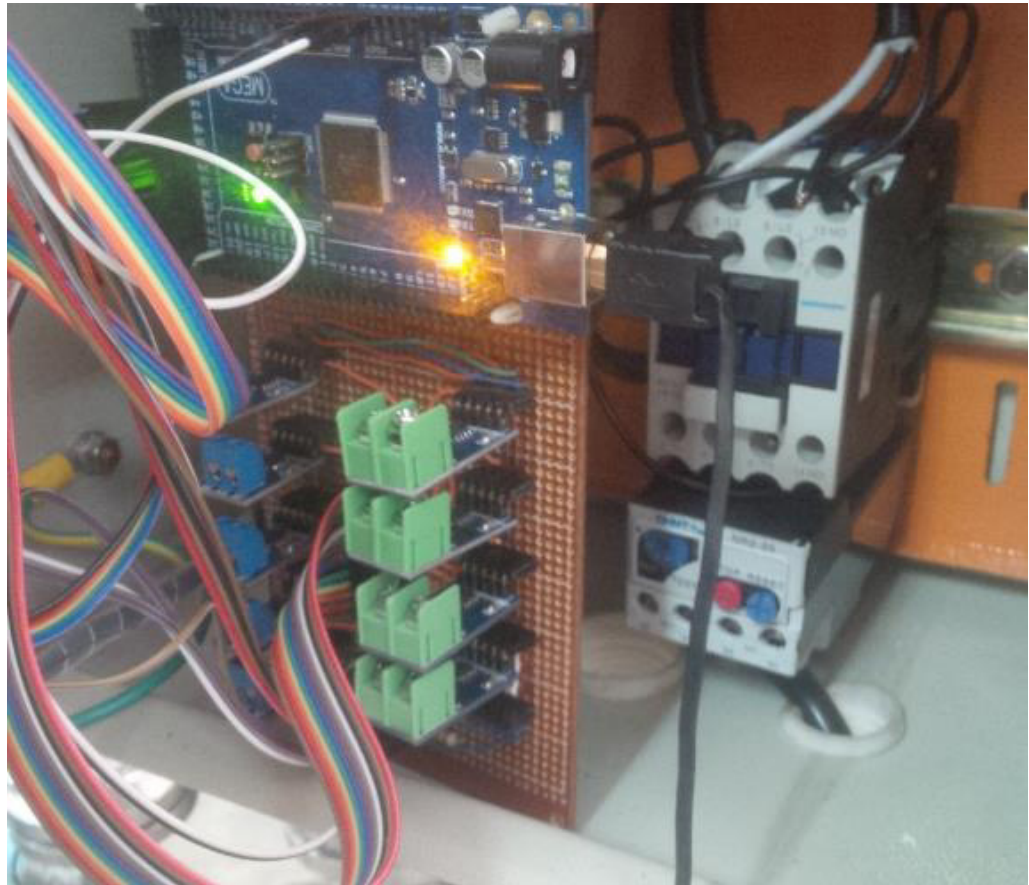


Gráfico 14. Instalación de sensores de temperatura.

Pruebas hidrostáticas y calibración de instrumentos.

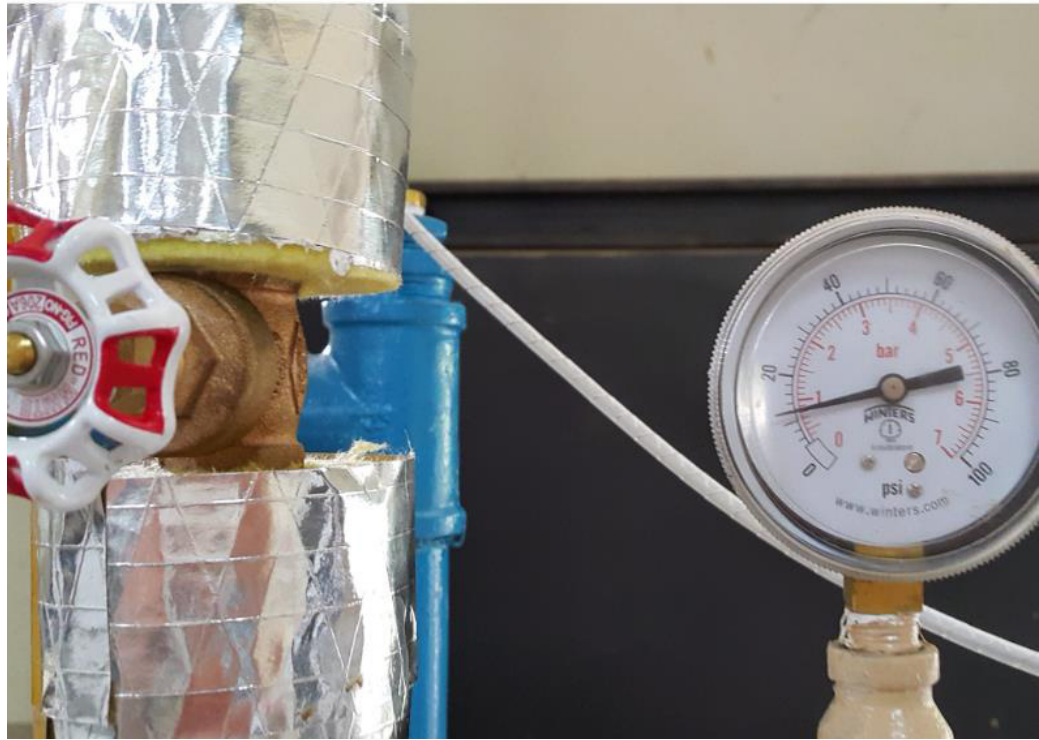


Gráfico 15. Pruebas hidrostáticas y calibración de instrumentos.

Puesta en marcha de la Unidad de Transferencia de Calor.



Gráfico 16. Puesta en marcha de la UTC.

4.3. Diagrama de Proceso e Instrumentación

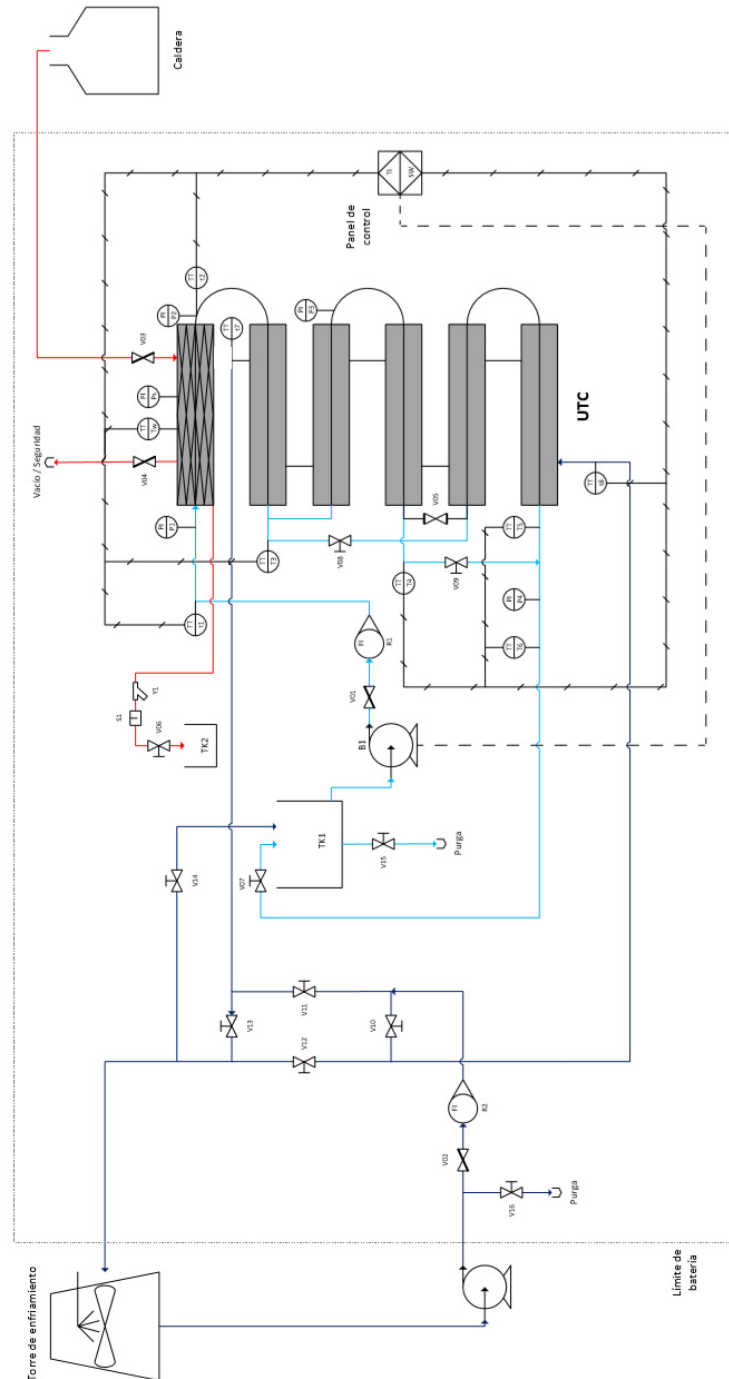


Diagrama 6. Diagrama de Proceso e Instrumentación

La Tabla 14 detalla los equipos e instrumentos del Diagrama 6.

Tabla 14. Descripción de equipos e instrumentos del proceso.

Equipo / Instrumento	Código	Descripción
Unidad de Transferencia de Calor	UTC	Permite el intercambio de calor en un sistema de doble tubo.
Tanque de almacenamiento	TK1	Contiene el fluido de trabajo.
	TK2	Recoge el condensado del Calentador.
Bomba centrífuga	B1	Impulsa el fluido de trabajo a la Unidad de Transferencia de Calor.
Filtro	Y1	Retiene las impurezas arrastradas por el condensado.
Trampa termodinámica	S1	Retiene el vapor dejando fluir únicamente al condensado.
Switch Start/Stop B1	SW	Enciende o apaga la bomba.
Manómetros	P1, P2, P3 y P4	Miden la presión en el tubo interior.
	Ps	Mide la presión del vapor que ingresa a la Unidad.
Sensores de temperatura	t1, t2, T3, T4, T5 y T6	Miden la temperatura en el tubo interior.
	t7 y t8	Miden la temperatura del agua de enfriamiento, en el exterior.
	Tw	Mide la temperatura de la superficie de la pared del tubo, en el Calentador.
Rotámetros	R1 y R2	Indican el caudal de entrada del fluido de trabajo y agua de enfriamiento.
Válvulas	V1 y V2	Permiten regular el caudal de entrada del fluido de trabajo y agua de enfriamiento.
	V3	Alimentación de vapor al sistema.

	V4	Sirve de purga, válvula de seguridad y para eliminar el vacío dentro del Calentador
	V5, V8 y V9	Permiten cambiar el arreglo del sistema. Serie / Serie - paralelo.
	V6	Salida de condensado.
	V7	Retorno de fluido de trabajo a tanque de almacenamiento. Permite la calibración del rotámetro.
	V10, V11, V12 y V13	Juego de válvulas para cambiar la dirección de flujo del agua de enfriamiento.
	V14	Permite la calibración del rotámetro.
	V15 y V16	Purga del sistema.

4.4. Prueba hidráulica de la Unidad de Transferencia de Calor

Se realizaron varias corridas con diferentes caudales, previo a la toma de datos, dejando que el agua circule dentro de la Unidad hasta por dos horas. Además, se inspeccionó que los flujos circulen de manera correcta al variar los arreglos.

Además, se cargó a la Unidad con agua a presión, quedando retenida dentro de los tubos, y se inspeccionó al día siguiente.

Se detectaron fugas, mayormente en los accesorios y pocas en los puntos de soldadura. Estas fueron corregidas totalmente con resinas comerciales utilizadas industrial y domésticamente con este fin.

4.5. Descripción del sistema electrónico

El sistema electrónico instalado en la Unidad de transferencia de calor consta de 21 componentes: un microcontrolador Arduino Mega, dos pantallas LCD, nueve módulos de conversión a digital MAX6675 y nueve termocuplas tipo K.

El circuito tiene 9 entradas definidas, las cuales corresponden a cada una de las termocuplas tipo K, estas termocuplas son sensores de temperatura formados por dos alambres de distinto material y unidos en un extremo.

Al aplicar calor en la unión de los dos metales, se genera un voltaje muy pequeño en el orden de los milivoltios, a esta conversión directa de temperatura a voltaje se la conoce como el efecto Seebeck.

Las termocuplas tipo K tienen una sensibilidad de $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ y los dos alambres utilizados son de cromel y alumel. El cromel es una aleación de Ni-Cr, mientras que el alumel es una aleación de Ni-Al.

Los niveles de voltaje emitidos por las termocuplas son muy pequeños para poder ser interpretados por el microcontrolador, por lo cual es necesario contar con un dispositivo que permita amplificar dicho voltaje, por ello, conectado a cada una de las salidas de las termocuplas tipo K se encuentra un módulo MAX6675. Dicho módulo está diseñado para trabajar en conjunto con éste tipo de termocuplas, y se encarga de convertir el pequeño voltaje a una señal digital de doce bits que es enviada hacia el microcontrolador Arduino Mega mediante comunicación SPI. Este tipo de comunicación facilita la conexión de las nueve termocuplas debido a que ahorra puertos en el microcontrolador.

Una vez que la señal es interpretada por el microcontrolador, el mismo se encarga de tres funciones específicas: Realizar calibraciones de la temperatura obtenida con el fin de obtener valores más cercanos a la realidad; transmitir cada minuto la información de las nueve temperaturas hacia una computadora mediante comunicación serial alámbrica y, finalmente, presentar en tiempo real la temperatura de cada termocupla en las pantallas LCD.

CAPÍTULO 5

5. ANALISIS DE COSTOS Y COMERCIALIZACION

5.1. Preámbulo

El presente proyecto se encuentra dirigido al mercado académico y tiene como segmento objetivo a todas las universidades e instituciones que imparten educación técnica.

Actualmente en el Ecuador no existen proveedores de maquinarias de tipo industrial construidas a escala para usos académicos. Por lo cual, se reconoce la oportunidad de comercializar el intercambiador de calor

de tubos concéntricos para contribuir con el desarrollo académico de estudios industriales.

Se garantiza el cumplimiento de las necesidades de los clientes, mediante la construcción de equipos a medida, que cuenten con la asesoría técnica de ingenieros químicos en su diseño e implementación.

5.2. Análisis de Costos

El presupuesto para la construcción del intercambiador de calor de tubos concéntricos fue realizado bajo un esquema conservador, en el que únicamente se contemplaron rubros para permitir la ejecución de las principales funciones del equipo y demostrar de manera simple el fenómeno de transferencia de calor. Sin embargo, al ser un equipo construido bajo pedido, los costos están sujetos a variaciones en el diseño.

A continuación se desglosan los principales costos incurridos en la construcción del presente proyecto:

Tabla 15. Costos del proyecto.

RUBROS	CANTIDAD	VALOR (\$)
ESTRUCTURA	12	\$1,810.00
AISLANTE DE LANA DE VIDRIO	1	\$60.00
BRIDAS, CODOS Y TEES ACERO INOX 304	VARIOS	\$343.00
MANO DE OBRA TUBOS CONCENTRICOS	-	\$350.00
TUBOS DE ACERO INOX 304	12	\$1,057.00
INTERCONEXION	4	\$1,603.00
CODOS, ACOPLER, TEES, TUBERIAS, LLAVES	VARIOS	\$705.00
MANO DE OBRA INTERCONEXIONES	-	\$350.00
ROTAMETROS	2	\$345.00
TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE 200 LITROS	1	\$23.00
TRAMPA TERMODINAMICA DE VAPOR	1	\$180.00
ACCESORIOS DE MEDICION	21	\$876.00
MANO DE OBRA SENSORES	-	\$220.00
MANOMETROS, FILTRO DE VAPOR Y SIFON	VARIOS	\$116.00
TAPONES CON ROSCA PARA LOS SENSORES	9	\$80.00
TARJETA ELECTRONICA DE SENSORES	1	\$36.00
TERMOCUPLAS TIPO K	9	\$400.00
VISORES DE TEMPERATURAS	2	\$24.00
SOPORTE	1	\$400.00
MANO DE OBRA INSTALACION SOPORTE	-	\$75.00
SOPORTE METALICO	1	\$325.00
SISTEMA ELECTRICO	7	\$382.00
BOMBA PEDROLLO 110 LPM	1	\$297.00
CABLE CONCENTRICO 2 PASOS (m)	6	\$15.00
DISPOSITIVOS ELECTRICOS DE ARRANQUE	VARIOS	\$70.00
TOTAL	45	\$5,071.00

Como podemos observar, la construcción e implementación de un intercambiador de calor de tubos concéntricos, independientemente de su escala, es un proceso costoso porque involucra la combinación de variables como: tecnología en el uso de sensores, calidad en los materiales utilizados y conocimientos técnicos para su diseño y fabricación. Estas variables se ven reflejadas con elevados valores en los rubros de estructura, interconexiones y accesorios de medición.

5.3. Justificación de costos

El rubro más alto corresponde a las tuberías, que representan un 21% del presupuesto total, por su material de fabricación: acero inoxidable tipo 304. Hemos seleccionado este material, pese a su elevado costo en el mercado, por sus propiedades. Para el buen funcionamiento a largo plazo del equipo, es necesario emplear un material que tenga alta durabilidad y resistencia, que permita precautelar los efectos de los fluidos utilizados en su funcionamiento y de su exposición a agentes del ambiente. El acero, con un factor de conductividad térmica $k^*=26$ [BTU/(H)(PIE²)(F/PIE)], pese a no ser el mejor conductor de calor, es un material cuyo uso resulta totalmente viable en este tipo de proyectos frente a otro tipo de metales como el cobre, el oro o la plata. El cobre siendo un mejor conductor de calor (factor $k^*= 207$ a 224)

$[BTU/(H)(PIE^2)(F/PIE)]$, presenta desventajas en cuanto a su durabilidad; mientras que el oro y la plata, materiales durables, resistentes y excelentes transmisores de calor, tienen un costo demasiado elevado.

Como se puede apreciar en el cuadro anterior, las interconexiones representan un rubro bastante elevado a simple vista, sin embargo su contemplación es necesaria en la construcción del intercambiador de calor de tubos concéntricos, porque agrega versatilidad en el manejo de los tres arreglos de flujo, esto se debe a que con un simple esquema de ciertas válvulas abiertas y otra cerradas se obtienen flujos en paralelo y contracorriente, he incluso horquillas en serie. Por lo tanto, es un ahorro de espacio y dinero puesto a que no hay la necesidad de adquirir tres diferentes unidades de transferencia de calor con el fin de estar en la posibilidad de demostrar los diferentes resultados al cambiar de esquema de arreglos, otorgando a la unidad de transferencia de calor un alto valor agregado.

Los accesorios de medición también constituyen un rubro importante en este proyecto, ya que si bien se podría prescindir de su instalación, su inversión genera un alto valor agregado en el equipo, que permite ampliar los alcances de su funcionalidad. Mediante la implementación

de sensores de temperatura, el usuario puede visualizar la fluctuación de temperaturas y facilitar el registro de las mismas en todos los pasos, al reflejarse las temperaturas de los nueve puntos del equipo en dos pantallas instaladas en la caja de mando. Adicionalmente, la visualización de datos es un aditamento que sintetiza la labor de medición, y es considerablemente útil en el registro de temperaturas de intercambiadores de calor de tubos concéntricos de gran dimensión con un gran número de puntos. Para estos fines, el equipo cuenta con un sensor especial que permite cuantificar la temperatura de la lámina de condensado, formada en la pared exterior del tubo sometido al calentamiento por el vapor. Este dato es habitualmente asumido por los estudiantes en el estudio del fenómeno de transferencia de calor.

5.4. Comercialización

La viabilidad comercial de un producto es un factor fundamental al momento de decidir si este debe o no ser desarrollado, puesto que es un indicador de la aceptación en el mercado del producto y por ende de la factibilidad de su fabricación. Generalmente los productos industriales o desarrollados por la ingeniería, para poder ingresar y competir en el mercado deben proveer al usuario un conjunto de características que le aseguren funcionalidad, durabilidad y versatilidad.

Con el fin de que el equipo pueda ser considerado en un futuro como objeto de comercialización, se efectuó un análisis de sus principales características, que sirva de ayuda para realizar comparaciones con otros equipos de su misma rama. Las mismas que se detallan a continuación:

Ventajas

- Resistencia a la corrosión debido a que su estructura principal es de acero inoxidable 304
- El uso de acero inoxidable nos permite tener una estructura libre de electroestática por su contenido de cromo y níquel.
- Alta capacidad, el equipo somete al intercambio de calor 6600 litros en una hora.
- Equipo supero los 200000 kJ/h
- Versatilidad al contar con una interconexión que nos permite obtener con el mismo equipo tres diferentes arreglos.
- La medición de la temperatura es automática por contar con nueve sensores de temperatura.
- Los valores de temperatura son visualizados en la caja de control del equipo, esto nos permite recopilar los datos en un solo punto, a

diferencia de tener que hacer las mediciones en cada punto a 3.5 metros de distancia.

- Capacidad de exportar los datos obtenidos por los sensores mediante una conexión a un ordenador en donde quedan registradas las temperaturas cada minuto.
- Posibilidad de obtener mediciones de la temperatura de la lámina de condensado presente en la superficie exterior del tubo concéntrico, dato que habitualmente se estima para proceder con los cálculos. Esto permite en todas las prácticas poder comprobar dichas estimaciones.
- Se presenta un ahorro de dinero y espacio al obtener tres arreglos en un solo equipo
- Medir de forma sencilla y eficaz los flujos mediante la implementación de rotámetros.

Desventajas

- Debido al uso de rotámetros de PC no se recomienda utilizar ninguna clase de solventes tales como: alcohol, acetona, diluyentes, hexano, tolueno, benceno, xileno, etc., en ninguna concentración.

- Las secciones están unidas completamente, lo cual no nos permite únicamente trabajar con la sección de calentamiento o a su vez únicamente con la sección de enfriamiento.
- Dependencia total de las líneas de servicios, si carecemos de un servicio, el equipo no puede trabajar.
- Carencia de una interconexión de la salida del condensado hacia el recipiente de agua para el caldero, se podría aprovechar este gradiente de temperatura y ahorrar en combustible.
- Los rotámetros están diseñados para ser usados con agua o líquidos de similar densidad, excluyendo los químicos prohibidos en el punto inicial.

CAPÍTULO 6

6. EVALUACIÓN DE LA UNIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR

6.1. Pruebas experimentales

La evaluación de la Unidad de Transferencia de Calor está enfocada a la comprobación de los Objetivos del Proyecto, mas no a la demostración del comportamiento del fenómeno de transferencia de calor en diferentes arreglos o a diferentes caudales.

La Unidad de Transferencia de calor construida cuenta con una amplia gama de condiciones para realizar prácticas, puesto que el fin es dotar al Laboratorio de un Equipo versátil y didáctico. Queda a disposición de los profesores y estudiantes la experimentación utilizando las diversas condiciones que la Unidad permite.

Para efecto de evaluar a la Unidad de Transferencia consideramos el escenario teórico en el que hay menor recuperación de calor: Calentador a contracorriente y Enfriador en serie con flujos en paralelo. Conociendo el comportamiento de la Unidad bajo estas condiciones es posible determinar el éxito en los procesos de diseño y construcción de la misma.

Se presentan los datos de 4 pruebas a las que se sometió la Unidad de Transferencia de Calor de Tubos Concéntricos, bajo condiciones de caudales diferentes y con el arreglo mencionado anteriormente. La Tabla 16 muestra dichas condiciones.

Los datos de temperatura fueron descargados en el computador a intervalos de un minuto. Los sensores permiten tomar lecturas cada segundo pero con el propósito de apreciar la variación de temperatura tomamos lecturas por minuto. La operación finaliza cuando llegue al

estado estable, donde las temperaturas no varían significativamente en los intervalos de medición; esto ocurrió aproximadamente a los 10 minutos de operación. Las lecturas completas se encuentran en la sección de Anexos. Los flujos máscicos del agua de trabajo y agua de enfriamiento son fijados en el respectivo rotámetro. El flujo de vapor se determina pesando el condensado en una balanza y dividiendo para el tiempo de operación. Se deben medir directamente los manómetros para determinar la caída de presión.

Tabla 16. Condiciones de operación para las Pruebas Experimentales.

N°	Arreglo		Caudal		
	Calentador	Enfriador	m _{trabajo} (LPM)	m _{vapor} (kg/h)	M _{fría} (LPM)
1	Contracorriente	Paralelo	30	75	40
2			45	95	75
3			55	105	85
4			50	100	80

A continuación se presentan las lecturas de temperaturas junto con el procesamiento de los datos y gráficos resultantes. Las propiedades fueron calculadas por medio de ecuaciones experimentales cuya descripción se encuentra en la sección de ANEXOS.

PRUEBA 1*Tabla 17. PRUEBA 1: Temperaturas.*

t (min)	Temperaturas (°C)							
	t1	t2	T3	Tw	T5	T6	t7	t8
0	32,18	37,13	36,00	37,75	29,25	33,01	26,56	28,47
1	32,73	37,40	35,75	37,25	29,25	32,77	26,56	28,47
2	29,70	45,38	41,25	107,75	33,30	33,01	26,14	31,45
3	28,60	53,08	44,50	107,50	42,30	43,22	26,56	36,13
4	31,07	55,28	48,25	106,50	42,52	44,41	26,56	38,25
5	31,62	55,00	49,00	106,75	43,20	45,13	26,78	38,68
6	32,45	56,38	51,25	109,50	43,88	45,60	27,20	39,10
7	33,28	56,93	53,50	110,50	45,00	46,08	27,62	39,53
8	34,65	56,38	54,50	111,25	45,68	47,02	28,05	40,59
9	36,03	57,75	56,50	112,25	47,25	45,13	28,05	41,23
10	36,03	57,75	56,50	114,50	48,82	45,13	28,05	42,29

Tabla 18. PRUEBA 1: Calentador. Características de vapor.

Características de vapor			
Ps (bar)	Ts (°C)	Hvap (kJ/kg)	Re
2,36	125	2188,5	41945

Tabla 19. PRUEBA 1: Calentador. Propiedades del fluido de trabajo.

Tiempo (min)	Propiedades del agua				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	307,81	991,12	2,68	4,18	2,23
1	308,22	990,96	2,66	4,18	2,24
2	310,69	989,95	2,53	4,18	2,25
3	313,99	988,58	2,38	4,18	2,26
4	316,33	987,58	2,28	4,18	2,27
5	316,46	987,52	2,27	4,18	2,27
6	317,57	987,04	2,23	4,18	2,28
7	318,26	986,74	2,20	4,18	2,28
8	318,67	986,56	2,18	4,18	2,28
9	320,04	985,95	2,13	4,18	2,29
10	320,04	985,95	2,13	4,18	2,29

Tabla 20. PRUEBA 1: Calentador. Propiedades del condensado.

Tiempo (min)	Propiedades de la película				
	Ts - Tw (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	87,25	989,87	2,52	4,18	2,25
1	87,75	990,07	2,55	4,18	2,25
2	17,25	951,56	0,93	4,23	2,45
3	17,50	951,73	0,93	4,23	2,45
4	18,50	952,42	0,94	4,23	2,45
5	18,25	952,25	0,94	4,23	2,45
6	15,50	950,34	0,91	4,23	2,46
7	14,50	949,64	0,91	4,23	2,46
8	13,75	949,11	0,90	4,24	2,46
9	12,75	948,40	0,89	4,24	2,46
10	10,50	946,79	0,87	4,24	2,46

Tabla 21. PRUEBA 1: Calentador. Transferencia de Calor.

Tiempo (min)	Q (kJ/h)	MLDT (°C)	Ud (kJ/h-m ² -°C)
0	37228	90	326
1	35120	90	309
2	117897	87	1068
3	184032	84	1740
4	181993	81	1771
5	175753	81	1712
6	179886	80	1777
7	177782	79	1771
8	163349	79	1634
9	163278	78	1663
10	163278	78	1663

Tabla 22. PRUEBA 1: Calentador. Números adimensionales.

Tiempo (min)	[Pr]	[Re]	[Nu]
0	5,0	24291	141
1	5,0	24491	142
2	4,7	25716	144
3	4,4	27397	148
4	4,2	28618	150
5	4,2	28689	150
6	4,1	29277	151
7	4,0	29647	152
8	4,0	29868	152
9	3,9	30614	154
10	3,9	30614	154

Tabla 23. PRUEBA 1: Calentador. Coeficientes de transferencia de calor.

Tiempo (min)	h _{io} (kJ/h-m ² -°C)	h _o (kJ/h-m ² -°C)	U _c (kJ/h-m ² -°C)	R _d (h-m ² -°C/kJ)
0	7491	16607	5162	0,0029
1	7519	16532	5168	0,0030
2	7690	33454	6253	0,0008
3	7917	33312	6397	0,0004
4	8078	32766	6480	0,0004
5	8087	32900	6491	0,0004
6	8163	34515	6602	0,0004
7	8210	35183	6657	0,0004
8	8238	35719	6694	0,0005
9	8333	36489	6783	0,0005
10	8333	38509	6850	0,0005

Tabla 24. PRUEBA 1: Calentador. Caídas de presión.

ΔP Interior (bar)	ΔP Ánulo (bar)
0,003	0,002

Tabla 25. PRUEBA 1: Calentador. Eficiencia.

Tiempo (min)	CALENTADOR		
	Cmin	ϵ	NTU
0	7521	0,05	0,05
1	7520	0,05	0,05
2	7519	0,16	0,18
3	7518	0,25	0,29
4	7517	0,26	0,30
5	7517	0,25	0,29
6	7517	0,26	0,30
7	7517	0,26	0,30
8	7517	0,24	0,28
9	7517	0,24	0,28
10	7517	0,24	0,28

Tabla 26. PRUEBA 1: Enfriador. Propiedades del fluido de trabajo.

Tiempo (min)	Propiedades del agua de trabajo (interior)				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	308,22	990,95	2,66	4,18	2,24
1	308,24	990,95	2,66	4,18	2,24
2	312,35	989,27	2,45	4,18	2,25
3	321,30	985,39	2,08	4,18	2,29
4	323,00	984,62	2,02	4,18	2,30
5	323,22	984,52	2,01	4,18	2,30
6	324,14	984,10	1,98	4,18	2,30
7	324,66	983,86	1,96	4,18	2,31
8	324,85	983,77	1,96	4,18	2,31
9	324,59	983,89	1,97	4,18	2,31
10	324,59	983,89	1,97	4,18	2,31

Tabla 27. PRUEBA 1: Enfriador. Propiedades del agua de enfriamiento.

Tiempo (min)	Propiedades del agua de enfriamiento (exterior)				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	300,67	993,88	3,11	4,18	2,20
1	300,67	993,88	3,11	4,18	2,20
2	301,95	993,40	3,03	4,18	2,21
3	304,50	992,42	2,87	4,18	2,22
4	305,56	992,01	2,81	4,18	2,22
5	305,88	991,88	2,79	4,18	2,23
6	306,30	991,72	2,77	4,18	2,23
7	306,73	991,55	2,74	4,18	2,23
8	307,47	991,25	2,70	4,18	2,23
9	307,79	991,13	2,68	4,18	2,23
10	308,32	990,91	2,66	4,18	2,24

Tabla 28. PRUEBA 1: Enfriador. Transferencia de calor.

Tiempo (min)	Q (kJ/h)	MLDT (°C)	Ud (kJ/h-m ² -°C)
0	30984	7	686
1	34820	7	778
2	93000	7	2089
3	74124	15	795
4	81722	15	881
5	74205	15	795
6	81051	15	848
7	81579	15	849
8	70377	15	753
9	94887	13	1180
10	94887	11	1311

Tabla 29. PRUEBA 1: Enfriador. Números adimensionales.

Tiempo (min)	[Pr] interior	[Re] interior	[Nu] interior	[Pr] exterior	[Re] exterior	[Nu] exterior
0	5,0	24494	121	5,9	23296	146
1	5,0	24501	121	5,9	23296	146
2	4,5	26552	125	5,7	23941	147
3	3,8	31305	135	5,4	25254	150
4	3,7	32246	137	5,3	25810	151
5	3,7	32370	138	5,2	25982	152
6	3,6	32889	139	5,2	26206	152
7	3,6	33181	139	5,1	26433	153
8	3,5	33291	139	5,1	26833	154
9	3,6	33144	139	5,0	27006	154
10	3,6	33144	139	5,0	27293	154

Tabla 30. PRUEBA 1: Enfriador. Coeficientes de transferencia de calor.

Tiempo (min)	h _{io} (kJ/h·m ² ·°C)	h _o (kJ/h·m ² ·°C)	U _c (kJ/h·m ² ·°C)	R _d (h·m ² ·°C/kJ)
0	6405	6284	3172	0,0011
1	6406	6284	3172	0,0010
2	6707	6363	3265	0,0002
3	7368	6521	3459	0,0010
4	7493	6587	3505	0,0008
5	7510	6607	3515	0,0010
6	7578	6633	3537	0,0009
7	7616	6659	3553	0,0009
8	7631	6706	3569	0,0010
9	7612	6725	3571	0,0006
10	7612	6758	3580	0,0005

Tabla 31. PRUEBA 1: Enfriador. Caídas de presión.

ΔP Interior (bar)	ΔP Ánulo (bar)
0,016	0,006

Tabla 32. PRUEBA 1: Enfriador. Eficiencia.

Tiempo (min)	ENFRIADOR			
	C _{min}	C _{max}	ϵ	NTU
0	7520	10038	0,39	0,58
1	7520	10038	0,43	0,65
2	7518	10035	0,64	1,76
3	7518	10032	0,37	0,67
4	7518	10030	0,38	0,74
5	7518	10030	0,35	0,67
6	7519	10029	0,37	0,71
7	7519	10029	0,37	0,71
8	7519	10028	0,33	0,63
9	7519	10028	0,42	0,99
10	7519	10027	0,42	1,10

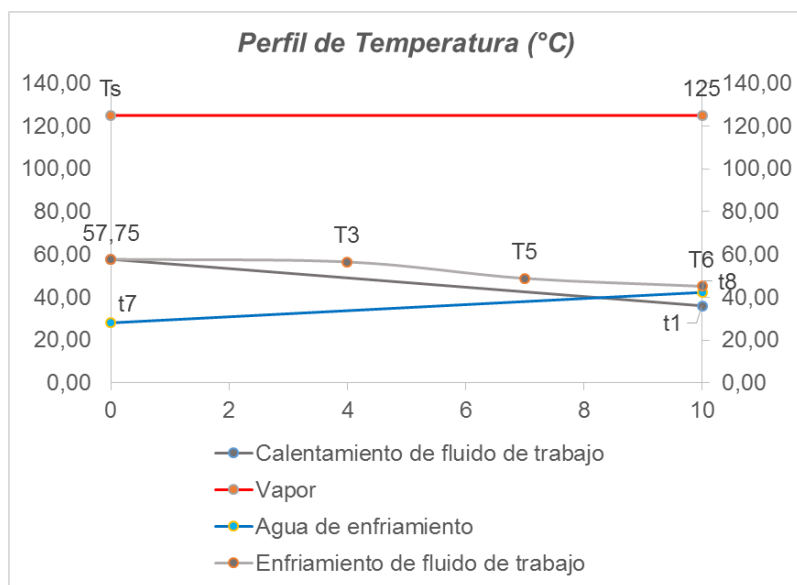


Gráfico 17. PRUEBA 1: Perfil de temperatura.

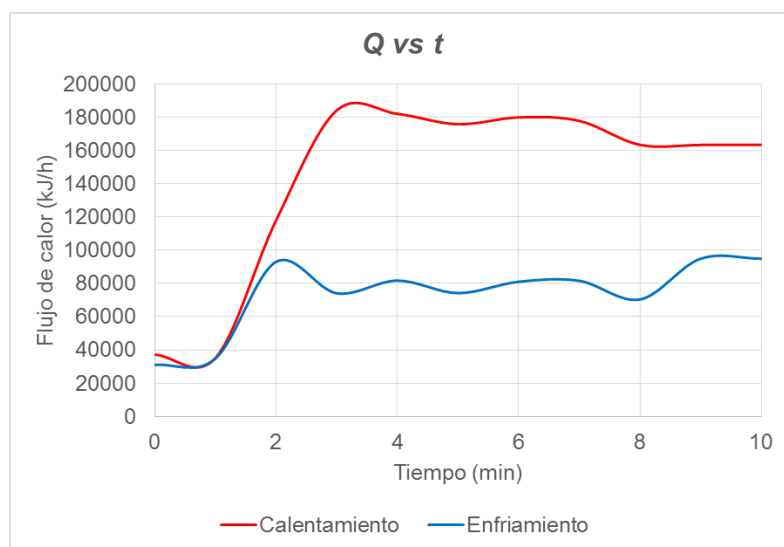


Gráfico 18. PRUEBA 1: Transferencia de calor.

Los datos de esta prueba no resultan satisfactorios como se puede observar en el Gráfico 18, la Unidad calienta al fluido pero no recupera en similar proporción el calor.

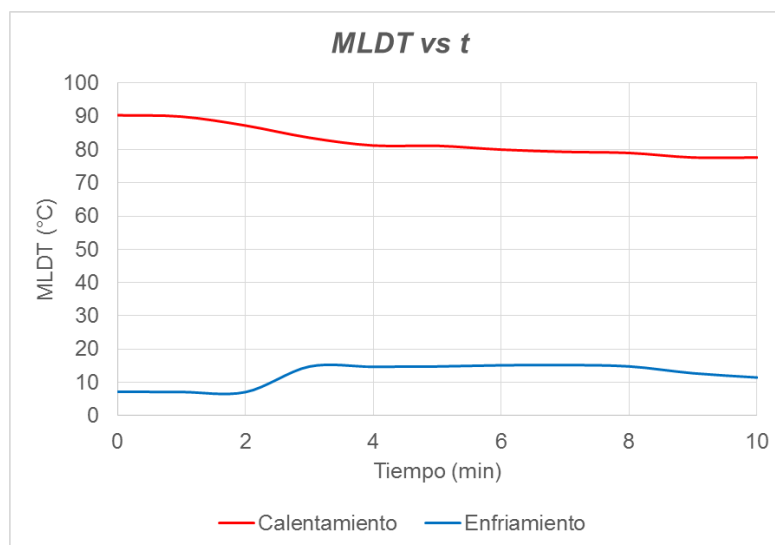


Gráfico 19. PRUEBA 1: Variación de MLDT.

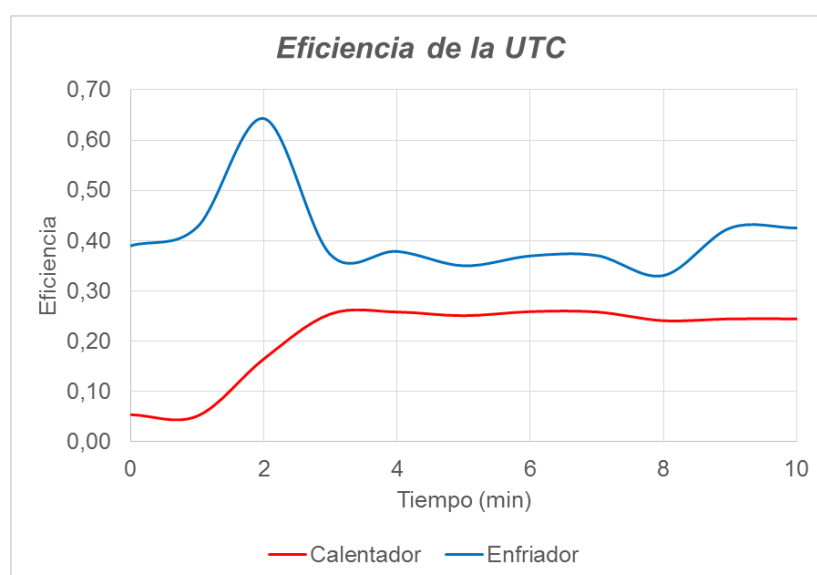


Gráfico 20. PRUEBA 1: Eficiencia de la UTC.

La fuerza impulsora de este fenómeno no se mantiene constante, sino que desciende sustancialmente. Las eficiencias lucen dispares. Suponemos un error en la recepción de la señal de temperaturas, t_7 y t_8 .

PRUEBA 2*Tabla 33. PRUEBA 2: Temperaturas.*

t (min)	Temperaturas (°C)							
	t1	t2	T3	Tw	T5	T6	t7	t8
0	35,48	39,60	39,50	47,75	31,95	35,50	26,99	30,39
1	32,45	45,38	45,00	104,00	40,05	40,50	27,20	34,43
2	32,73	49,23	47,00	103,50	41,40	43,75	27,20	36,13
3	33,83	50,05	49,00	104,75	41,85	44,75	26,99	36,98
4	35,75	52,25	50,00	105,00	42,52	45,50	27,41	36,98
5	35,48	53,90	51,00	107,50	43,88	46,50	28,05	38,25
6	37,40	55,55	53,00	107,25	44,77	47,75	27,62	39,10
7	38,78	56,10	53,50	108,00	45,45	48,50	28,69	39,74
8	39,05	56,93	55,25	110,25	46,35	49,25	28,90	39,74
9	40,43	58,30	56,25	110,00	46,80	49,50	29,11	40,80
10	40,70	59,40	57,00	111,00	47,70	50,00	29,32	41,44

Tabla 34. PRUEBA 2: Calentador. Características de vapor.

Características de vapor			
Ps (bar)	Ts (°C)	Hvap (kJ/kg)	Re
2,36	125	2188,5	53130

Tabla 35. PRUEBA 2: Calentador. Propiedades del fluido de trabajo.

Tiempo (min)	Propiedades del agua				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	310,69	989,95	2,53	4,18	2,25
1	312,07	989,38	2,47	4,18	2,25
2	314,13	988,52	2,37	4,18	2,26
3	315,09	988,11	2,33	4,18	2,27
4	317,15	987,22	2,24	4,18	2,28
5	317,84	986,92	2,22	4,18	2,28
6	319,63	986,14	2,14	4,18	2,29
7	320,59	985,71	2,11	4,18	2,29
8	321,14	985,46	2,09	4,18	2,29
9	322,52	984,84	2,04	4,18	2,30
10	323,20	984,53	2,01	4,18	2,30

Tabla 36. PRUEBA 2: Calentador. Propiedades del condensado.

Tiempo (min)	Propiedades de la película				
	Ts - Tw (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	77,25	985,57	2,10	4,18	2,29
1	21,00	954,12	0,97	4,22	2,45
2	21,50	954,46	0,97	4,22	2,45
3	20,25	953,61	0,96	4,23	2,45
4	20,00	953,44	0,96	4,23	2,45
5	17,50	951,73	0,93	4,23	2,45
6	17,75	951,90	0,94	4,23	2,45
7	17,00	951,39	0,93	4,23	2,45
8	14,75	949,82	0,91	4,23	2,46
9	15,00	949,99	0,91	4,23	2,46
10	14,00	949,29	0,90	4,24	2,46

Tabla 37. PRUEBA 2: Calentador. Transferencia de calor.

Tiempo (min)	Q (kJ/h)	MLDT (°C)	Ud (kJ/h-m ² -°C)
0	46467	87	420
1	145817	86	1341
2	186061	84	1756
3	182899	83	1746
4	186051	81	1821
5	207700	80	2053
6	204659	78	2069
7	195304	77	1998
8	201622	77	2078
9	201520	75	2115
10	210886	75	2235

Tabla 38. PRUEBA 2: Calentador. Números adimensionales.

Tiempo (min)	[Pr]	[Re]	[Nu]
0	4,7	38574	200
1	4,6	39615	201
2	4,4	41204	204
3	4,3	41953	206
4	4,1	43583	208
5	4,1	44136	209
6	3,9	45581	212
7	3,8	46372	213
8	3,8	46825	214
9	3,7	47968	216
10	3,7	48542	217

Tabla 39. PRUEBA 2: Calentador. Coeficientes de transferencia de calor.

Tiempo (min)	hio (kJ/h-m ² -°C)	ho (kJ/h-m ² -°C)	Uc (kJ/h-m ² -°C)	Rd (h-m ² -°C/kJ)
0	10636	18148	6706	0,0022
1	10768	31531	8027	0,0006
2	10964	31303	8120	0,0004
3	11056	31884	8209	0,0005
4	11251	32005	8325	0,0004
5	11317	33312	8447	0,0004
6	11486	33172	8532	0,0004
7	11577	33598	8610	0,0004
8	11629	35011	8730	0,0004
9	11759	34843	8792	0,0004
10	11824	35537	8872	0,0003

Tabla 40. PRUEBA 2: Calentador. Caídas de presión.

ΔP Interior (bar)	ΔP Ánulo (bar)
0,007	0,003

Tabla 41. PRUEBA 2: Enfriador. Propiedades del fluido de trabajo.

Tiempo (min)	Propiedades del agua de trabajo (interior)				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	310,70	989,95	2,53	4,18	2,25
1	316,09	987,68	2,29	4,18	2,27
2	319,64	986,13	2,14	4,18	2,29
3	320,55	985,73	2,11	4,18	2,29
4	322,03	985,06	2,06	4,18	2,30
5	323,35	984,46	2,01	4,18	2,30
6	324,80	983,79	1,96	4,18	2,31
7	325,45	983,49	1,94	4,18	2,31
8	326,24	983,12	1,91	4,18	2,31
9	327,05	982,74	1,89	4,18	2,32
10	327,85	982,36	1,86	4,18	2,32

Tabla 42. PRUEBA 2: Enfriador. Propiedades del agua de enfriamiento.

Tiempo (min)	Propiedades del agua de enfriamiento (exterior)				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	301,84	993,44	3,03	4,18	2,21
1	303,97	992,63	2,90	4,18	2,22
2	304,82	992,30	2,85	4,18	2,22
3	305,14	992,17	2,83	4,18	2,22
4	305,35	992,09	2,82	4,18	2,22
5	306,30	991,72	2,77	4,18	2,23
6	306,51	991,63	2,75	4,18	2,23
7	307,37	991,30	2,71	4,18	2,23
8	307,47	991,25	2,70	4,18	2,23
9	308,11	991,00	2,67	4,18	2,24
10	308,53	990,83	2,64	4,18	2,24

Tabla 43. PRUEBA 2: Enfriador. Transferencia de calor.

Tiempo (min)	Q (kJ/h)	MLDT (°C)	Ud (kJ/h-m ² -°C)
0	46241	8	880
1	55026	11	788
2	61792	14	720
3	59764	14	672
4	76118	15	789
5	83453	15	856
6	87971	16	845
7	85719	16	829
8	86626	17	799
9	99265	17	927
10	106040	17	979

Tabla 44. PRUEBA 2: Enfriador. Números adimensionales.

Tiempo (min)	[Pr] interior	[Re] interior	[Nu] interior	[Pr] exterior	[Re] exterior	[Nu] exterior
0	4,7	38582	171	5,8	44789	244
1	4,2	42741	179	5,5	46833	247
2	3,9	45594	185	5,4	47664	249
3	3,8	46339	186	5,3	47979	250
4	3,7	47559	189	5,3	48187	250
5	3,6	48668	191	5,2	49136	252
6	3,5	49894	193	5,2	49346	252
7	3,5	50448	194	5,1	50205	254
8	3,5	51126	195	5,1	50311	254
9	3,4	51824	196	5,0	50956	255
10	3,4	52518	198	4,9	51389	256

Tabla 45. PRUEBA 2: Enfriador. Coeficientes de transferencia de calor.

Tiempo (min)	hio (kJ/h-m ² -°C)	ho (kJ/h-m ² -°C)	Uc (kJ/h-m ² -°C)	Rd (h-m ² -°C/kJ)
0	9110	10510	4880	0,0009
1	9659	10728	5083	0,0011
2	10021	10815	5202	0,0012
3	10114	10848	5234	0,0013
4	10265	10870	5279	0,0011
5	10401	10968	5338	0,0010
6	10550	10989	5382	0,0010
7	10616	11077	5421	0,0010
8	10697	11088	5444	0,0011
9	10780	11153	5482	0,0009
10	10862	11196	5513	0,0008

Tabla 46. PRUEBA 2: Enfriador. Caídas de presión.

ΔP Interior (bar)	ΔP Ánulo (bar)
0,032	0,020

Tabla 47. PRUEBA 2: Calentador. Eficiencia.

Tiempo (min)	CALENTADOR		
	Cmin	ϵ	NTU
0	11278	0,05	0,05
1	11277	0,14	0,15
2	11276	0,18	0,20
3	11276	0,18	0,20
4	11276	0,18	0,20
5	11276	0,21	0,23
6	11276	0,21	0,23
7	11276	0,20	0,22
8	11276	0,21	0,23
9	11277	0,21	0,24
10	11277	0,22	0,25

Tabla 48. PRUEBA 2: Enfriador. Eficiencia.

Tiempo (min)	ENFRIADOR			
	Cmin	Cmax	ϵ	NTU
0	11278	18817	0,33	0,49
1	11276	18811	0,27	0,44
2	11276	18808	0,25	0,40
3	11276	18808	0,23	0,38
4	11277	18807	0,27	0,44
5	11277	18805	0,29	0,48
6	11278	18804	0,28	0,47
7	11279	18803	0,28	0,46
8	11279	18802	0,27	0,45
9	11280	18801	0,30	0,52
10	11281	18801	0,31	0,55

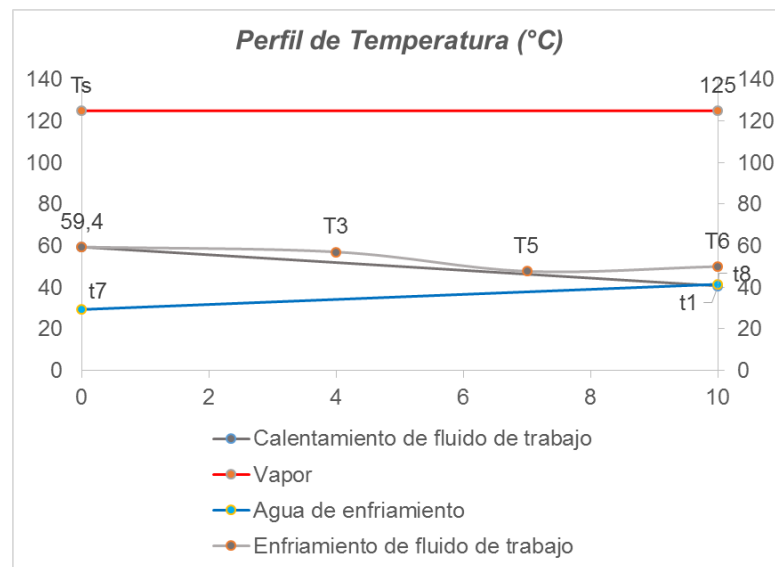


Gráfico 21. PRUEBA 2: Perfil de temperatura.

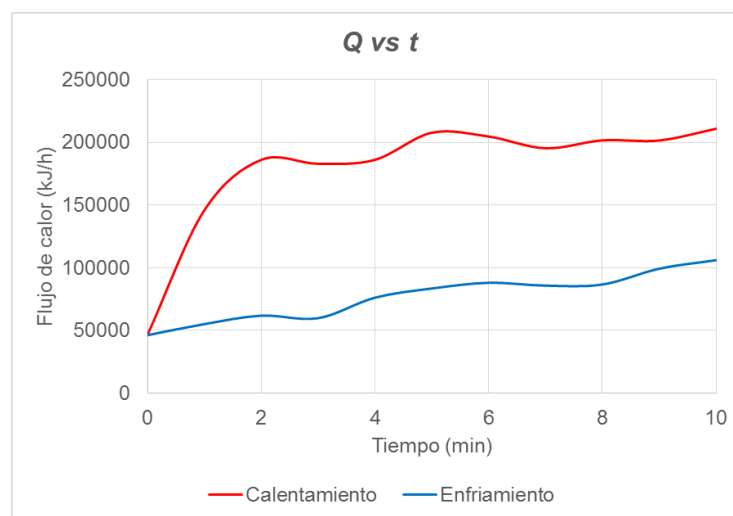


Gráfico 22. PRUEBA 2: Transferencia de calor.

El balance de calor resulta más exacto que en la Prueba 1, sin embargo, no se llegan a los valores deseados. No se logra estabilizar en el tiempo de operación. El perfil de temperaturas se mantiene similar a la Prueba anterior.

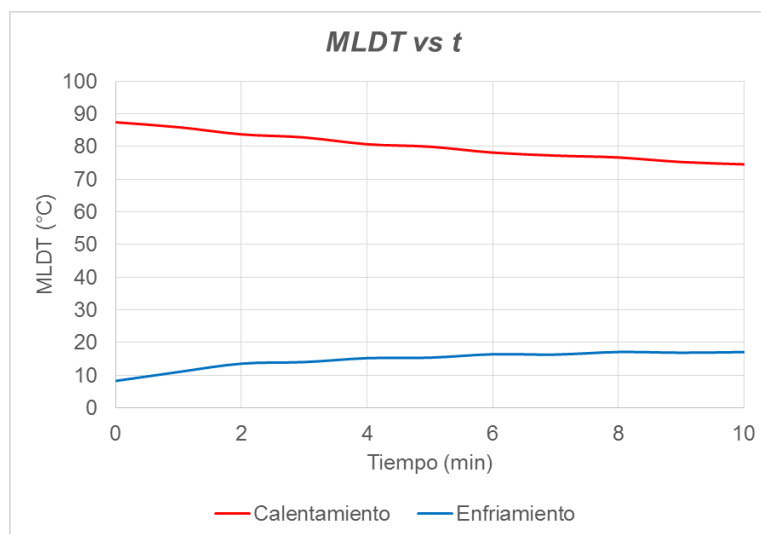


Gráfico 23. PRUEBA 2: Variación de la MLDT.

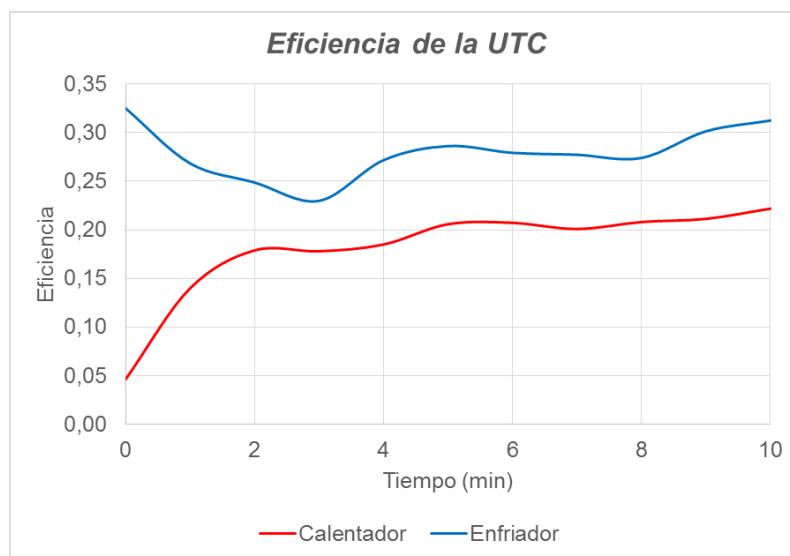


Gráfico 24. PRUEBA 2: Eficiencia de la UTC.

A pesar de que no se logra remover toda la cantidad de calor en el Enfriador, este se muestra más eficiente que el calentador. El motivo principal es la capacidad que tiene el vapor para calentar al fluido de trabajo.

PRUEBA 3*Tabla 49. PRUEBA 3: Temperaturas.*

T (min)	Temperaturas (°C)							
	t1	t2	T3	Tw	T5	T6	t7	t8
0	44,00	60,78	59,75	104,50	48,38	47,97	30,39	39,80
1	44,00	61,60	60,75	106,00	48,82	48,21	30,60	40,00
2	45,10	62,70	61,50	109,00	49,50	48,69	30,81	39,80
3	45,10	62,98	60,75	109,50	50,18	49,64	30,60	41,00
4	45,93	62,70	61,25	110,25	50,40	49,40	30,81	41,00
5	45,38	62,98	61,75	111,75	50,63	49,88	30,39	40,20
6	45,10	63,25	62,00	110,25	50,85	50,59	30,81	40,60
7	46,20	62,98	62,00	108,50	49,72	49,88	30,81	40,20
8	46,48	62,98	61,75	106,75	49,95	50,11	30,81	40,00
9	45,93	62,70	61,50	107,50	50,40	49,88	30,81	40,40
10	45,65	63,25	62,25	108,75	50,63	49,88	30,81	40,20

Tabla 50. PRUEBA 3: Calentador. Características de vapor.

Características de vapor			
Ps (bar)	Ts (°C)	Hvap (kJ/kg)	Re
2,36	125	2188,5	58723

Tabla 51. PRUEBA 3: Calentador. Propiedades del fluido de trabajo.

Tiempo (min)	Propiedades del agua				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	325,54	983,45	1,93	4,18	2,31
1	325,95	983,26	1,92	4,18	2,31
2	327,05	982,74	1,89	4,18	2,32
3	327,19	982,68	1,88	4,18	2,32
4	327,47	982,55	1,87	4,18	2,32
5	327,33	982,61	1,88	4,18	2,32
6	327,33	982,61	1,88	4,18	2,32
7	327,74	982,42	1,86	4,18	2,32
8	327,88	982,35	1,86	4,18	2,32
9	327,47	982,55	1,87	4,18	2,32
10	327,60	982,48	1,87	4,18	2,32

Tabla 52. PRUEBA 3: Calentador. Propiedades del agua de enfriamiento.

Tiempo (min)	Propiedades de la película				
	Ts - Tw (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	20,50	953,78	0,96	4,23	2,45
1	19,00	952,76	0,95	4,23	2,45
2	16,00	950,69	0,92	4,23	2,45
3	15,50	950,34	0,91	4,23	2,46
4	14,75	949,82	0,91	4,23	2,46
5	13,25	948,76	0,89	4,24	2,46
6	14,75	949,82	0,91	4,23	2,46
7	16,50	951,04	0,92	4,23	2,45
8	18,25	952,25	0,94	4,23	2,45
9	17,50	951,73	0,93	4,23	2,45
10	16,25	950,87	0,92	4,23	2,45

Tabla 53. PRUEBA 3: Calentador. Transferencia de calor.

Tiempo (min)	Q (kJ/h)	MLDT (°C)	Ud (kJ/h-m ² -°C)
0	231317	72	2529
1	242628	72	2669
2	242648	71	2711
3	246511	71	2760
4	231213	70	2597
5	242654	70	2722
6	250237	70	2808
7	231356	70	2609
8	227498	70	2570
9	231213	70	2597
10	242659	70	2732

Tabla 54. PRUEBA 3: Calentador. Números adimensionales.

Tiempo (min)	[Pr]	[Re]	[Nu]
0	3,5	61753	258
1	3,5	62182	259
2	3,4	63341	261
3	3,4	63489	261
4	3,4	63780	261
5	3,4	63637	261
6	3,4	63632	261
7	3,4	64072	262
8	3,4	64221	262
9	3,4	63780	261
10	3,4	63923	261

Tabla 55. PRUEBA 3: Calentador. Coeficientes de transferencia de calor.

Tiempo (min)	hio (kJ/h-m²-°C)	ho (kJ/h-m²-°C)	Uc (kJ/h-m²-°C)	Rd (h-m²-°C/kJ)
0	14141	31765	9785	0,0003
1	14186	32505	9876	0,0003
2	14307	34198	10087	0,0003
3	14322	34515	10122	0,0003
4	14353	35011	10180	0,0003
5	14338	36096	10262	0,0003
6	14337	35011	10172	0,0003
7	14383	33893	10098	0,0003
8	14398	32900	10015	0,0003
9	14353	33312	10031	0,0003
10	14367	34044	10104	0,0003

Tabla 56. PRUEBA 3: Calentador. Caídas de presión.

ΔP Interior (bar)	ΔP Ánulo (bar)
0,009	0,004

Tabla 57. PRUEBA 3: Enfriador. Propiedades del fluido de trabajo.

Tiempo (min)	Propiedades del agua de trabajo (interior)				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	327,53	982,52	1,87	4,18	2,32
1	328,06	982,27	1,86	4,18	2,32
2	328,85	981,89	1,83	4,18	2,32
3	329,46	981,59	1,81	4,18	2,32
4	329,20	981,72	1,82	4,18	2,32
5	329,58	981,54	1,81	4,18	2,32
6	330,07	981,30	1,79	4,18	2,33
7	329,58	981,54	1,81	4,18	2,32
8	329,70	981,48	1,81	4,18	2,32
9	329,44	981,60	1,81	4,18	2,32
10	329,72	981,47	1,81	4,18	2,32

Tabla 58. PRUEBA 3: Enfriador. Propiedades del agua de enfriamiento.

Tiempo (min)	Propiedades del agua de enfriamiento (exterior)				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	308,25	990,94	2,66	4,18	2,24
1	308,45	990,86	2,65	4,18	2,24
2	308,46	990,86	2,65	4,18	2,24
3	308,95	990,66	2,62	4,18	2,24
4	309,06	990,62	2,62	4,18	2,24
5	308,45	990,86	2,65	4,18	2,24
6	308,86	990,70	2,63	4,18	2,24
7	308,66	990,78	2,64	4,18	2,24
8	308,56	990,82	2,64	4,18	2,24
9	308,76	990,74	2,63	4,18	2,24
10	308,66	990,78	2,64	4,18	2,24

Tabla 59. PRUEBA 3: Enfriador. Transferencia de calor.

Tiempo (min)	Q (kJ/h)	MLDT (°C)	Ud (kJ/h-m ² -°C)
0	176616	17	1650
1	184621	17	1701
2	193183	18	1696
3	183956	18	1618
4	183399	18	1646
5	180648	19	1513
6	174589	19	1448
7	180648	19	1525
8	177478	19	1472
9	176784	18	1513
10	184374	19	1548

Tabla 60. PRUEBA 3: Enfriador. Números adimensionales.

Tiempo (min)	[Pr] interior	[Re] interior	[Nu] interior	[Pr] exterior	[Re] exterior	[Nu] exterior
0	3,4	63844	231	5,0	57911	282
1	3,3	64407	232	4,9	58148	283
2	3,3	65250	234	4,9	58154	283
3	3,3	65910	235	4,9	58729	284
4	3,3	65631	234	4,9	58851	284
5	3,3	66039	235	4,9	58142	283
6	3,2	66568	236	4,9	58618	283
7	3,3	66039	235	4,9	58386	283
8	3,2	66163	235	4,9	58270	283
9	3,3	65889	235	4,9	58502	283
10	3,2	66185	235	4,9	58386	283

Tabla 61. PRUEBA 3: Enfriador. Coeficientes de transferencia de calor.

Tiempo (min)	hio (kJ/h·m ² ·°C)	ho (kJ/h·m ² ·°C)	Uc (kJ/h·m ² ·°C)	Rd (h·m ² ·°C/kJ)
0	12715	12343	6263	0,0004
1	12778	12366	6284	0,0004
2	12873	12367	6307	0,0004
3	12947	12423	6340	0,0005
4	12916	12435	6335	0,0004
5	12962	12366	6328	0,0005
6	13021	12412	6355	0,0005
7	12962	12389	6335	0,0005
8	12975	12378	6335	0,0005
9	12945	12401	6333	0,0005
10	12978	12389	6338	0,0005

Tabla 62. PRUEBA 3: Enfriador. Caídas de presión.

ΔP Interior (bar)	ΔP Ánulo (bar)
0,046	0,025

Tabla 63. PRUEBA 3: Calentador. Eficiencia.

Tiempo (min)	CALENTADOR		
	Cmin	ϵ	NTU
0	13785	0,21	0,23
1	13786	0,22	0,24
2	13787	0,22	0,25
3	13787	0,22	0,25
4	13787	0,21	0,24
5	13787	0,22	0,25
6	13787	0,23	0,26
7	13788	0,21	0,24
8	13788	0,21	0,24
9	13787	0,21	0,24
10	13787	0,22	0,25

Tabla 64. PRUEBA 3: Enfriador. Eficiencia.

Tiempo (min)	ENFRIADOR			
	Cmin	Cmax	ϵ	NTU
0	13787	21308	0,42	0,76
1	13788	21307	0,43	0,78
2	13789	21307	0,44	0,78
3	13790	21307	0,41	0,74
4	13789	21306	0,42	0,76
5	13790	21307	0,40	0,69
6	13791	21307	0,39	0,66
7	13790	21307	0,41	0,70
8	13790	21307	0,40	0,68
9	13790	21307	0,40	0,69
10	13790	21307	0,41	0,71

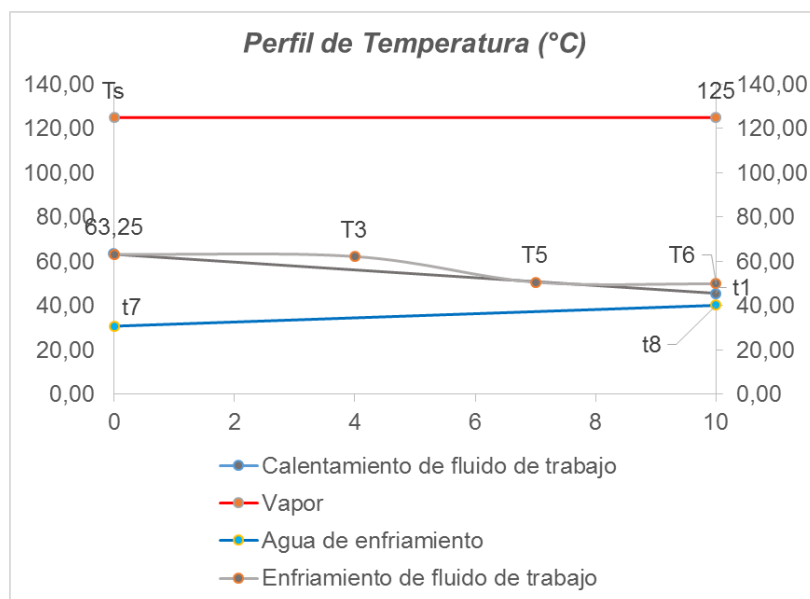


Gráfico 25. PRUEBA 3: Perfil de temperatura.

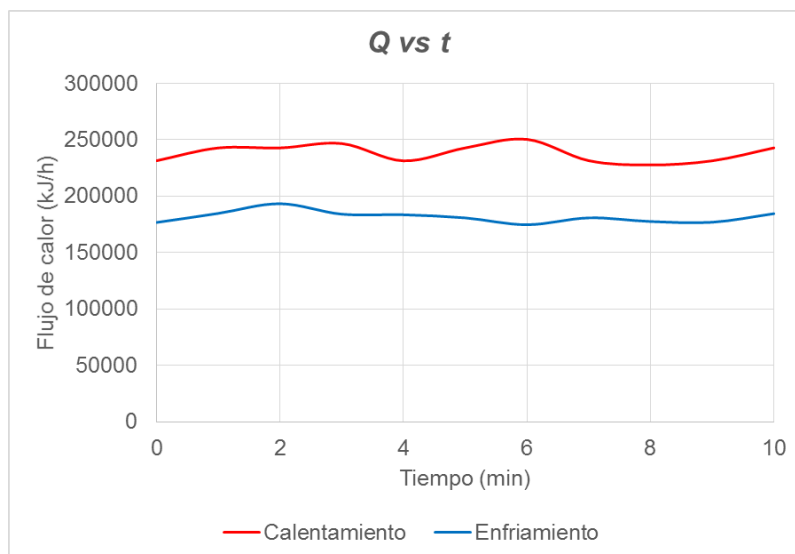


Gráfico 26. PRUEBA 3: Transferencia de calor.

Prueba satisfactoria. La Unidad supera los 200000 kJ/h en el Calentador y los recupera casi en su totalidad en el Enfriador. La diferencia son pérdidas secundarias como radiación.

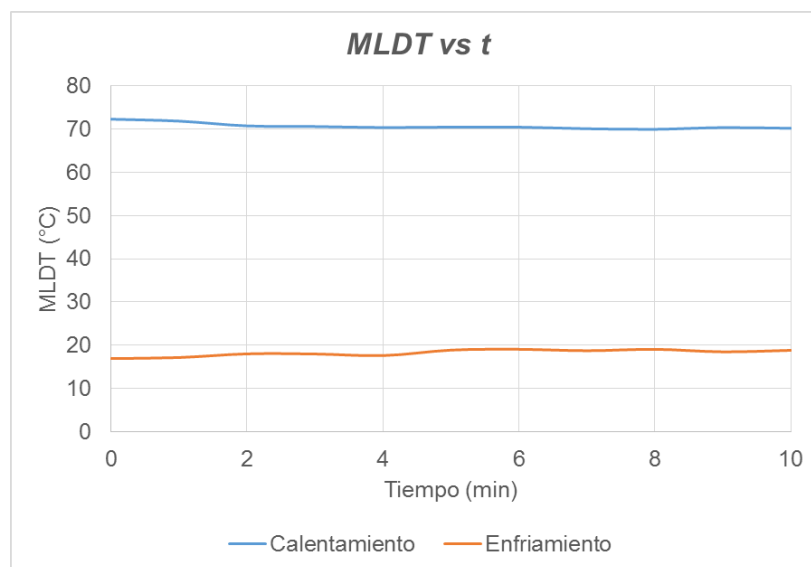


Gráfico 27. PRUEBA 3: Variación de MLDT.

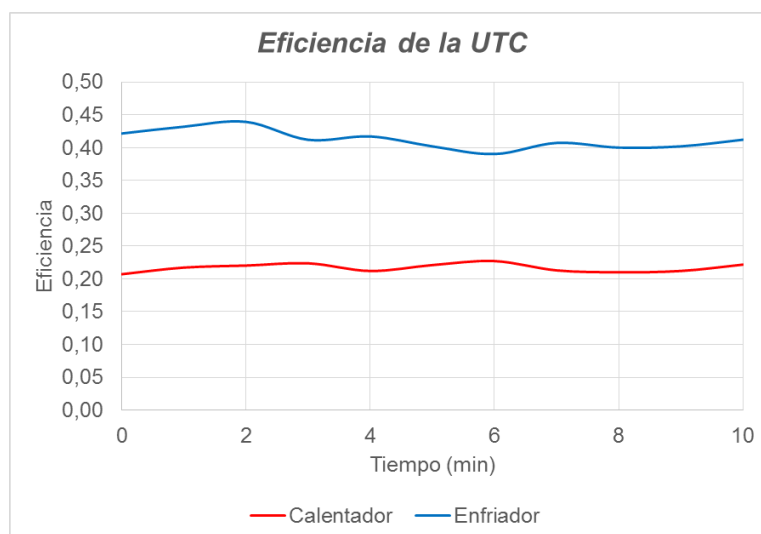


Gráfico 28. PRUEBA 3: Eficiencia de la UTC.

Tanto la fuerza impulsora como la Eficiencia se mantienen estables durante el período de operación en esta Prueba. El Equipo opera en estado estacionario.

PRUEBA 4*Tabla 65. PRUEBA 4: Temperaturas.*

t (min)	Temperaturas (°C)							
	t1	t2	T3	Tw	T5	T6	t7	t8
0	47,85	61,88	60,00	108,25	48,60	49,16	29,32	39,60
1	47,03	62,70	60,25	111,00	48,82	49,64	29,54	39,80
2	47,03	63,80	60,75	110,25	49,50	49,88	29,54	40,00
3	47,03	64,08	61,25	110,75	49,50	50,35	29,32	40,00
4	47,03	64,08	61,25	112,75	49,50	51,06	29,75	40,40
5	48,68	64,08	61,75	107,75	50,18	51,06	29,96	40,80
6	48,68	64,35	61,25	106,50	49,50	51,06	29,96	41,00
7	49,23	63,80	61,25	107,00	49,27	50,35	30,18	40,40
8	47,58	62,98	61,50	107,25	49,05	50,35	30,60	40,60
9	48,13	63,80	61,75	107,75	49,27	50,59	30,18	40,40
10	47,30	64,62	61,50	108,75	49,95	51,06	30,39	40,60

Tabla 66. PRUEBA 4: Calentador. Características de vapor.

Características de vapor			
Ps (bar)	Ts (°C)	Hvap (kJ/kg)	Re
2,36	125	2188,5	55926

Tabla 67. PRUEBA 4: Calentador. Propiedades del fluido de trabajo.

Tiempo (min)	Propiedades del agua				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	328,02	982,29	1,86	4,18	2,32
1	328,02	982,29	1,86	4,18	2,32
2	328,57	982,02	1,84	4,18	2,32
3	328,71	981,96	1,84	4,18	2,32
4	328,71	981,96	1,84	4,18	2,32
5	329,53	981,56	1,81	4,18	2,32
6	329,67	981,50	1,81	4,18	2,32
7	329,67	981,50	1,81	4,18	2,32
8	328,43	982,09	1,84	4,18	2,32
9	329,12	981,76	1,82	4,18	2,32
10	329,11	981,76	1,82	4,18	2,32

Tabla 68. PRUEBA 4: Calentador. Propiedades del agua de enfriamiento.

Tiempo (min)	Propiedades de la película				
	Ts - Tw (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	16,75	951,21	0,93	4,23	2,45
1	14,00	949,29	0,90	4,24	2,46
2	14,75	949,82	0,91	4,23	2,46
3	14,25	949,46	0,90	4,23	2,46
4	12,25	948,05	0,89	4,24	2,46
5	17,25	951,56	0,93	4,23	2,45
6	18,50	952,42	0,94	4,23	2,45
7	18,00	952,08	0,94	4,23	2,45
8	17,75	951,90	0,94	4,23	2,45
9	17,25	951,56	0,93	4,23	2,45
10	16,25	950,87	0,92	4,23	2,45

Tabla 69. PRUEBA 4: Calentador. Transferencia de calor.

Tiempo (min)	Q (kJ/h)	MLDT (°C)	Ud (kJ/h-m ² -°C)
0	175859	70	1988
1	196415	70	2222
2	210214	69	2399
3	213726	69	2444
4	213726	69	2444
5	193058	68	2233
6	196445	68	2277
7	182655	68	2116
8	193038	69	2197
9	196435	69	2258
10	217119	69	2498

Tabla 70. PRUEBA 4: Calentador. Números adimensionales.

Tiempo (min)	[Pr]	[Re]	[Nu]
0	3,3	58513	243
1	3,3	58513	243
2	3,3	59046	244
3	3,3	59182	244
4	3,3	59182	244
5	3,3	59987	245
6	3,2	60119	245
7	3,2	60119	245
8	3,3	58915	243
9	3,3	59582	244
10	3,3	59577	244

Tabla 71. PRUEBA 4: Calentador. Coeficientes de transferencia de calor.

Tiempo (min)	h _{io} (kJ/h·m ² ·°C)	h _o (kJ/h·m ² ·°C)	U _c (kJ/h·m ² ·°C)	R _d (h·m ² ·°C/kJ)
0	13355	33744	9568	0,0004
1	13355	35537	9707	0,0003
2	13411	35011	9697	0,0003
3	13425	35358	9730	0,0003
4	13425	36900	9844	0,0003
5	13509	33454	9623	0,0003
6	13522	32766	9572	0,0003
7	13522	33035	9595	0,0004
8	13397	33172	9543	0,0004
9	13467	33454	9602	0,0003
10	13466	34044	9649	0,0003

Tabla 72. PRUEBA 4: Calentador. Caídas de presión.

ΔP Interior (bar)	ΔP Ánulo (bar)
0,008	0,003

Tabla 73. PRUEBA 4: Enfriador. Propiedades del fluido de trabajo.

Tiempo (min)	Propiedades del agua de trabajo (interior)				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	328,67	981,97	1,84	4,18	2,32
1	329,32	981,66	1,82	4,18	2,32
2	329,99	981,34	1,80	4,18	2,33
3	330,37	981,16	1,79	4,18	2,33
4	330,72	980,99	1,78	4,18	2,33
5	330,72	980,99	1,78	4,18	2,33
6	330,86	980,92	1,77	4,18	2,33
7	330,23	981,23	1,79	4,18	2,33
8	329,82	981,42	1,80	4,18	2,33
9	330,35	981,17	1,79	4,18	2,33
10	330,99	980,85	1,77	4,18	2,33

Tabla 74. PRUEBA 4: Enfriador. Propiedades del fluido del agua de enfriamiento.

Tiempo (min)	Propiedades del agua de enfriamiento (exterior)				
	Temperatura media (K)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (kg/m-h)	Cp (kJ/kg-K)	k (kJ/kg-h-m)
0	307,61	991,20	2,69	4,18	2,23
1	307,82	991,11	2,68	4,18	2,23
2	307,92	991,07	2,68	4,18	2,23
3	307,81	991,12	2,68	4,18	2,23
4	308,23	990,95	2,66	4,18	2,24
5	308,53	990,83	2,64	4,18	2,24
6	308,63	990,79	2,64	4,18	2,24
7	308,44	990,87	2,65	4,18	2,24
8	308,75	990,74	2,63	4,18	2,24
9	308,44	990,87	2,65	4,18	2,24
10	308,65	990,78	2,64	4,18	2,24

Tabla 75. PRUEBA 4: Enfriador. Transferencia de calor.

Tiempo (min)	Q (kJ/h)	MLDT (°C)	Ud (kJ/h-m ² -°C)
0	159448	19	1343
1	163720	19	1348
2	174512	20	1407
3	172137	20	1350
4	163242	20	1275
5	163242	20	1299
6	166629	20	1331
7	168624	19	1371
8	158337	19	1327
9	165617	20	1334
10	170017	20	1340

Tabla 76. PRUEBA 4: Enfriador. Números adimensionales.

Tiempo (min)	[Re] interior	[Nu] interior	[Pr] exterior	[Re] exterior	[Nu] exterior
0	59148	216	5,0	53816	268
1	59782	217	5,0	54044	268
2	60438	219	5,0	54152	268
3	60806	219	5,0	54033	268
4	61156	220	5,0	54483	269
5	61156	220	4,9	54815	269
6	61289	220	4,9	54924	269
7	60668	219	4,9	54717	269
8	60266	218	4,9	55055	270
9	60786	219	4,9	54717	269
10	61422	220	4,9	54940	270

Tabla 77. PRUEBA 4: Enfriador. Coeficientes de transferencia de calor.

Tiempo (min)	hio (kJ/h-m ² -°C)	ho (kJ/h-m ² -°C)	Uc (kJ/h-m ² -°C)	Rd (h-m ² -°C/kJ)
0	11909	11690	5899	0,0006
1	11981	11713	5923	0,0006
2	12056	11724	5944	0,0005
3	12098	11712	5951	0,0006
4	12137	11757	5972	0,0006
5	12137	11789	5980	0,0006
6	12152	11800	5987	0,0006
7	12082	11780	5964	0,0006
8	12036	11813	5962	0,0006
9	12095	11780	5968	0,0006
10	12167	11802	5991	0,0006

Tabla 78. PRUEBA 4: Enfriador. Caídas de presión.

ΔP Interior (bar)	ΔP Ánulo (bar)
0,039	0,023

Tabla 79. PRUEBA 4: Calentador. Eficiencia.

Tiempo (min)	CALENTADOR		
	Cmin	ϵ	NTU
0	12534	0,18	0,20
1	12534	0,20	0,22
2	12535	0,22	0,24
3	12535	0,22	0,25
4	12535	0,22	0,25
5	12536	0,20	0,23
6	12536	0,21	0,23
7	12536	0,19	0,21
8	12535	0,20	0,22
9	12536	0,20	0,23
10	12536	0,22	0,25

Tabla 80. PRUEBA 4: Enfriador. Eficiencia.

Tiempo (min)	ENFRIADOR			
	Cmin	Cmax	ϵ	NTU
0	12535	20056	0,39	0,68
1	12536	20055	0,39	0,68
2	12537	20055	0,41	0,71
3	12537	20055	0,39	0,68
4	12538	20054	0,38	0,64
5	12538	20054	0,38	0,66
6	12538	20054	0,39	0,67
7	12537	20054	0,40	0,69
8	12537	20054	0,39	0,67
9	12537	20054	0,39	0,67
10	12538	20054	0,40	0,68

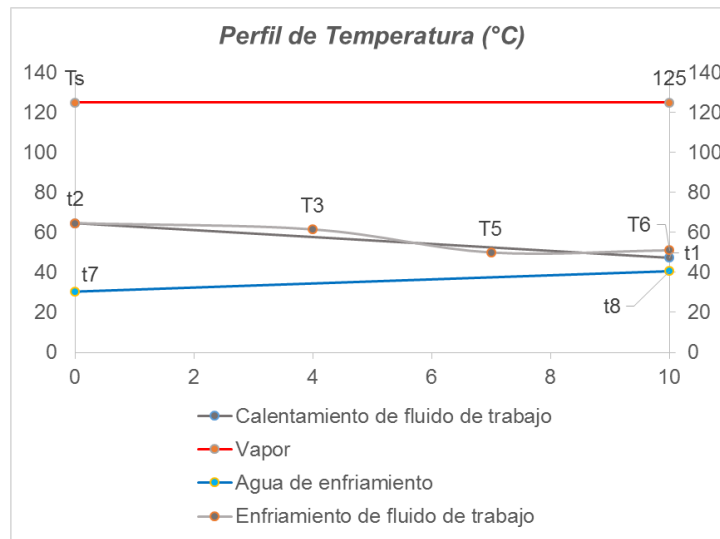


Gráfico 29. PRUEBA 4: Perfil de temperatura.

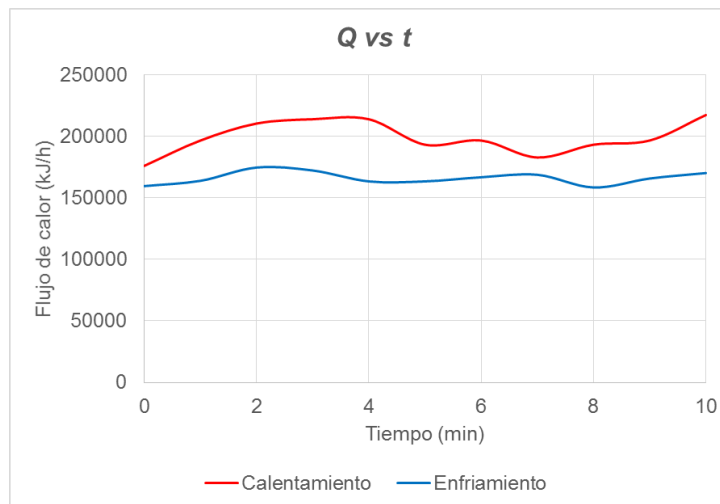


Gráfico 30. PRUEBA 4: Transferencia de calor.

El balance de calor resulta más exacto en esta Prueba. La Unidad es capaz de transferir el calor al fluido de trabajo y removerlo en una cantidad infinitesimal de tiempo. El perfil de temperaturas muestra claramente el movimiento energético de los fluidos.

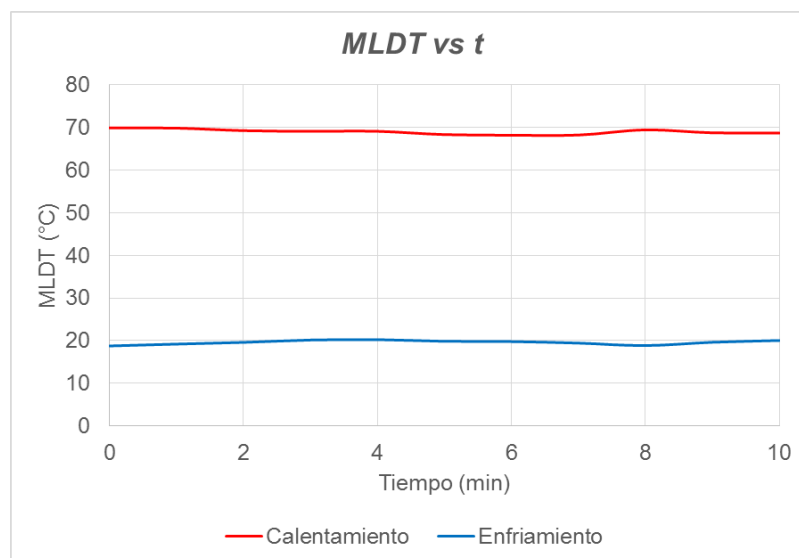


Gráfico 31. PRUEBA 4: Variación de la MLDT.

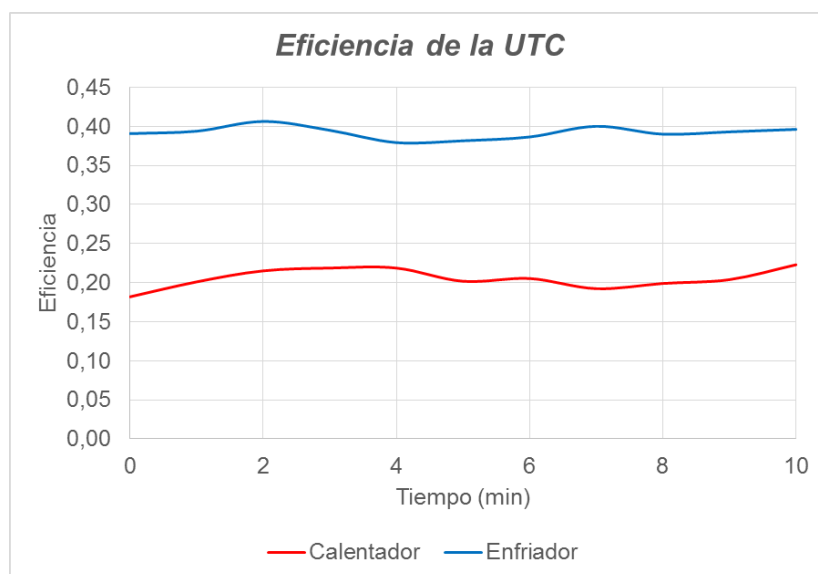


Gráfico 32. PRUEBA 4: Eficiencia de la UTC.

Tanto la MLDT como la eficiencia de cada sección se muestran constantes a lo largo de la operación. El Equipo alcanza el estado estacionario y se muestra adecuado para la operación.

EVALUACIÓN

El Calentador se mostró estable en las 4 Pruebas. Su eficiencia está cerca de 0,25, la cual es baja respecto al Enfriador, ya que tiene mayor capacidad para calentar al fluido que pasa por el interior; y puede mejorar si se aumenta el fluido de trabajo o si se disminuye el flujo de vapor, lo segundo no es posible en las condiciones actuales del laboratorio.

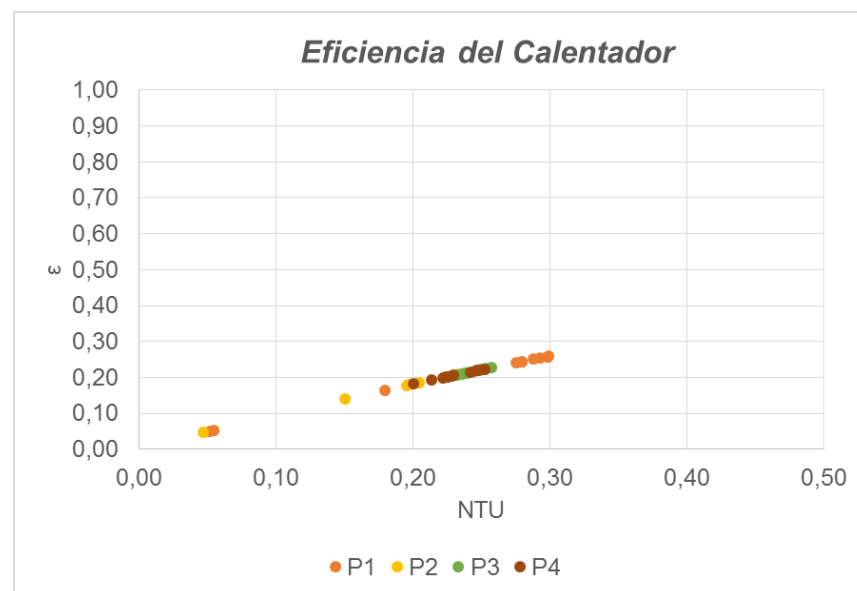


Gráfico 33. Eficiencia del Calentador en cada prueba.

El sensor ubicado en la superficie del tubo para medir la temperatura de la película de condensado trabaja eficientemente, dando valores lógicos en toda la operación y permite confirmar la teoría de los coeficientes de

convección. El porcentaje de error respecto a la temperatura teórica (calculada) es inferior al 5%, lo cual confirma el correcto funcionamiento.

Tabla 81. Evaluación: Temperatura de la pared del tubo en el Calentador.

	Tw (°C)		
	Teórica	Experimental	Error (%)
P1	111,11	114,50	3,06
P2	106,29	111,00	4,43
P3	104,06	108,75	4,50
P4	105,43	108,75	3,15

Esto también confirma que la calidad del vapor en las condiciones actuales de operación no incide significativamente en los resultados obtenidos en la experimentación.

Por su parte, el Enfriador mostró algunos problemas en cuanto a la toma de datos. Estos fueron solucionados con una nueva calibración de los sensores de temperatura. Sin embargo, se recomienda verificarlos periódicamente como método de prevención.

Las Pruebas 3 y 4 dieron valores sumamente satisfactorios en términos de balance de calor. La eficiencia del Enfriador bordea los 0.40 puntos. Además, la correcta lectura de temperaturas demostró que el equipo es capaz de llegar al estado estacionario en 10 minutos de operación.

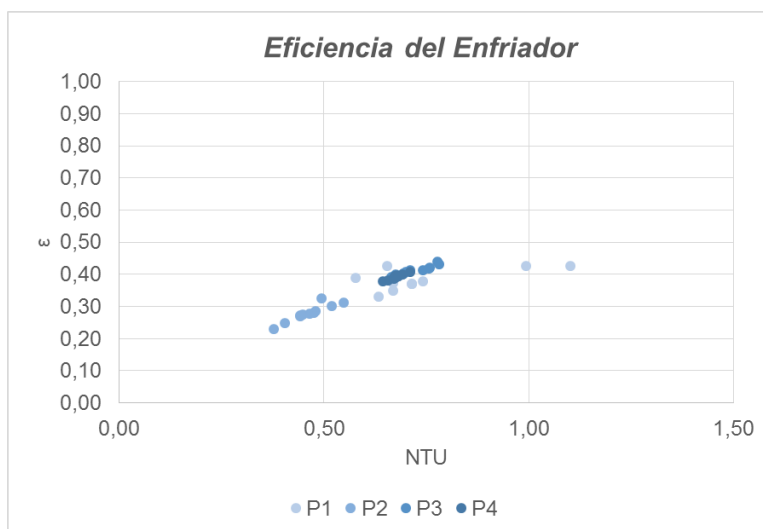


Gráfico 34. Eficiencia del Enfriador en cada prueba.

Los Gráficos 35 y 36 muestran la eficiencia global de cada sección en las condiciones de operación establecidas.

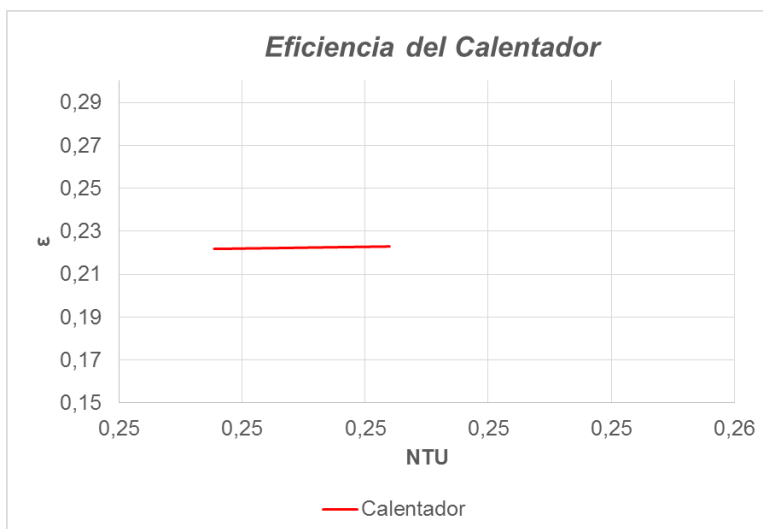


Gráfico 35. Eficiencia global del Calentador.

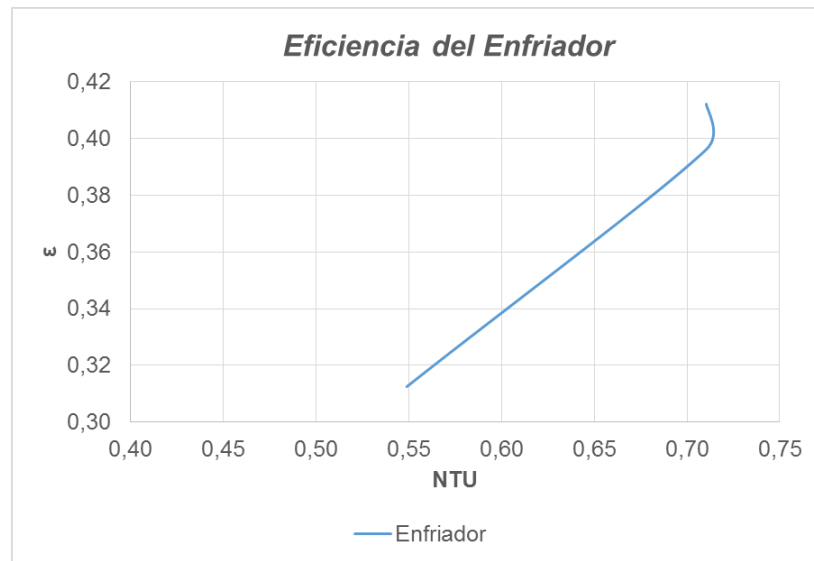


Gráfico 36. Eficiencia global del Enfriador.

El Gráficos 37 muestra la relación de eficiencias de ambas secciones, es decir, la capacidad de operación de la Unidad de Transferencia de Calor.

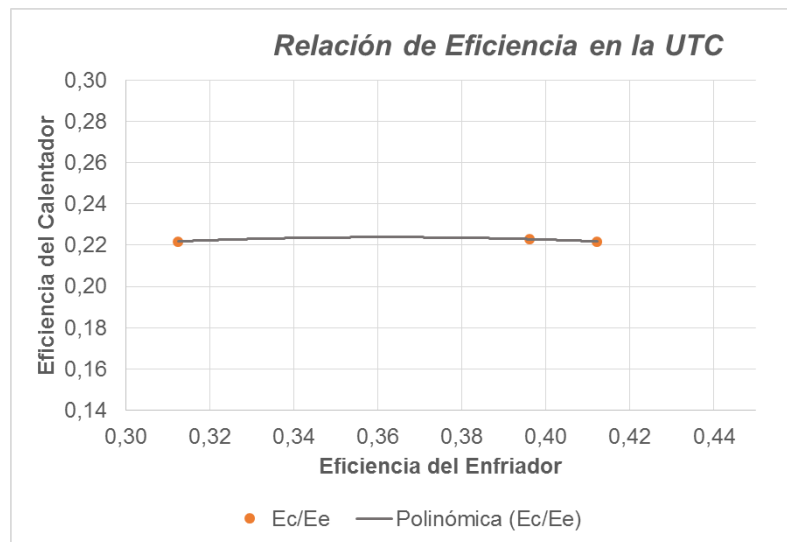


Gráfico 37. Relación de eficiencias en la UTC.

Respecto a los coeficientes globales, encontramos que estos son lógicos entre ellos, pero al comparar con las Tablas 12 y 13, de la Simulación, encontramos diferencias significativas. Esto es debido a la desviación de la idealidad y los errores propios de las correlaciones matemáticas utilizadas en transferencia de calor, además, de posibles errores de calibración en los sensores de temperatura. Sin embargo, se muestran mayores a los previstos teóricamente, lo que se traduce como mayor transferencia de calor bajo las mismas condiciones.

Tabla 82. Evaluación: Coeficientes de transferencia de calor.

	Calentador		Enfriador	
	Uc	Ud	Uc	Ud
P1	6322	1403	3445	997
P2	8306	1785	5296	826
P3	10066	2664	6323	1575
P4	9648	2280	5958	1339
PROM	8586	2033	5256	1184

Finalmente, los bajos valores de caída de presión en ambas secciones no ameritan análisis alguno. Al igual que en la simulación son imperceptibles.

Durante las pruebas realizadas el Equipo no mostró fuga alguna en su estructura y los efectos vibratorios o sonoros por la velocidad del agua y vapor en las tuberías no se manifestaron. Se concluye presentando al Equipo como mecánica y térmicamente satisfactorio.

6.2. Manual de operación y mantenimiento

PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN

Arranque del Equipo

1. Observar el Diagrama de Proceso e Instrumentación y reconocer la ubicación y correcto uso de cada equipo e instrumento de la Unidad.
2. Verificar que todas las válvulas estén cerradas y que los instrumentos de medición estén en buenas condiciones.
3. Preparar los servicios (vapor y agua de enfriamiento) utilizando los procedimientos específicos de cada sistema.
4. Encender el interruptor ubicado en el interior del Panel de control.

Operación del Equipo

5. Llenar el tanque TK1 con agua de la red pública.
6. Elegir uno de los arreglos de.
7. Encender la bomba de la Torre de Enfriamiento y verificar que el agua de enfriamiento retorne a la Torre. Caso contrario apagar la bomba y verificar las válvulas según el arreglo escogido.
8. Encender la bomba B1 pulsando el botón verde en SW y abrir la válvula V07.

9. Regular los caudales por medio de las válvulas V01 y V02, observando en los rotámetros R1 y R2. La calibración es opcional; se debe realizar de acuerdo al procedimiento expuesto en el presente Manual de Operación.
10. Abrir las válvulas V01 y V03 para la alimentación de vapor y salida de condensado.
11. Abrir con precaución la válvula V04 para purgar el sistema. Cerrarla luego de 10 segundos.
12. Tomar los datos a partir de este momento hasta llegar al estado estacionario.

Parada del Equipo

13. Cerrar la válvula V03.
14. Apagar la bomba de la Torre enfriamiento.
15. Apagar la bomba B1 pulsando el botón rojo en SW.
16. Detener los servicios (vapor y agua de enfriamiento) utilizando los procedimientos específicos de cada sistema.
17. Purgar el sistema abriendo las válvulas V15 y V16.
18. Luego de la purga cerrar todas las válvulas.
19. Apagar el interruptor ubicado en el Panel de control.

Calibración de Rotámetro (Opcional)

20. Se verifica la lectura del rotámetro tomando muestras del caudal en un tiempo determinado. Las muestras se toman por la válvula V07 para el fluido de trabajo y V14 para el agua de enfriamiento.
21. Tomar al menos 3 lecturas de cada flujo. Utilizar un cronómetro, baldes y la balanza del laboratorio.
22. Se debe tomar el peso de los baldes para determinar el peso neto del fluido o, en su defecto, tarar la balanza al peso del recipiente.
23. Ubicar el punto exacto del indicador del rotámetro para el flujo correspondiente.

DESCRIPCIÓN DE LOS ARREGLOS

Arreglo 1: Fluido de trabajo en Serie; Agua de enfriamiento en Paralelo

Arreglo 2: Fluido de trabajo en Serie; Agua de enfriamiento a Contracorriente

Arreglo 3: Fluido de trabajo en Serie - Paralelo; Agua de enfriamiento en Paralelo

Arreglo 4: Fluido de trabajo en Serie - Paralelo; Agua de enfriamiento a Contracorriente

IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS AMBIENTALES Y RIESGOS

Aspectos Ambientales

Consumo de energía eléctrica

Consumo de combustible

Consumo de agua potable

Generación de aguas residuales de proceso

Riesgos

Térmicos: Superficies y sustancias a altas temperaturas

Eléctrico: Cables y conexiones expuestas en Panel de control

MEDIDAS DE CONTROL Y PREVENCIÓN

- ✓ Encender únicamente los equipos para la realización de prácticas de laboratorio. Apagarlos al terminar la operación.
- ✓ En lo posible retornar el tanque de condensado al caldero.

- ✓ No tocar las superficies de la Unidad por donde circula el vapor y/o condensado.
- ✓ Abrir el panel de control únicamente para subir/bajar el Interruptor o conectar/desconectar el computador a la tarjeta.

TROUBLESHOOTING

Fugas en accesorios o puntos de soldadura: Se debe parar la operación con el procedimiento de parada establecido en este manual y proceder a examinar el daño. Se debe evaluar si la fuga amerita ser corregida con resina, cambiar la parte o realizar una soldadura.

Cortocircuito en panel de control: Se deben apagar inmediatamente los interruptores y switches de las bombas, al igual que el interruptor de alimentación. Contactar a un especialista para atender daño.

Fallas asociadas a la alimentación de vapor: Abrir con cuidado la válvula de seguridad V04 y cerrar la alimentación de vapor con la válvula V03. Purgar completamente el Calentador y atender el problema de origen.

SÍMBOLOGÍA PARA CIERRE / APERTURA DE VÁLVULAS



ABIERTA



CERRADA





























VÁLVULAS	ARREGLO 1	ARREGLO 2	ARREGLO 3	ARREGLO 4
V05				
V08				
V09				
V10				
V11				
V12				
V13				

Gráfico 38. Posición de válvulas según el arreglo.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

- Se logró construir y dotar de un equipo a escala piloto, didáctico y versátil, al Laboratorio de Operaciones Unitarias del DCQA, para el estudio de la transferencia de calor.
- Las condiciones actuales de laboratorio fueron correctamente aprovechadas para la construcción y operación de la Unidad de Transferencia de Calor de tubos concéntricos diseñada.

- La recuperación de calor alcanzó valores de 200000 kJ/h lo cual fue planteado a partir del diseño. Además, en cada sección hay un delta de temperatura de al menos 10 °C respecto al fluido de trabajo.
- Se pudo obtener el coeficiente global de transferencia de calor así como los coeficientes individuales de película, utilizando las ecuaciones pertinentes, demostrando que las ecuaciones mencionadas en las aulas se asemejan a los valores obtenidos en la práctica.
- Se construyó una unidad de transferencia de calor en acero inoxidable, adicionalmente esta fue equipada con los instrumentos de medición en los puntos claves, con el fin de determinar con mayor exactitud las variables experimentales.
- Los sistemas de alimentación y distribución de los fluidos fueron colocados de forma correcta, permitiendo los arreglos requeridos.
- Los accesorios empleados en la Unidad de Transferencia de Calor fueron correctamente seleccionados e instalados. El filtro de vapor y trampa termodinámica permiten que la colección de condensado se efectúe de forma adecuada y se alcancen valores bastante aproximados a los teóricos del balance de energía.
- Se halló experimentalmente valores de eficiencia, obteniendo valores de 25% para el calentador y 45% para el enfriador, detallando así el éxito de nuestro trabajo.

- Se redactó un Manual de Operación, detallando el correcto uso del equipo en los diferentes análisis a realizar.

7.2. Recomendaciones

La unidad de transferencia de calor se caracteriza por tener muchas ventajas, así mismo se registraron algunas desventajas las cuales nos ayudaran con la redacción de esta sección.

Es recomendable el uso de fluidos con densidad similar al agua esto con el fin de que los rotámetros no presenten ninguna variación en su medición con respecto a los valores reales.

El segundo punto, más que recomendable es estrictamente necesario que no se utilicen solventes como fluido a calentar o enfriar, esto se debe a que el material utilizado en los rotámetros es de PC el mismo que es susceptible a daños mayores al estar expuesto a solventes como alcoholes, xileno, tolueno, hexano, diluyentes.

Se deben revisar las fichas técnicas de los instrumentos de medición instalados en el Equipo para determinar las condiciones de trabajo como temperatura o presión.

Respecto al sistema de vapor, se debe realizar una limpieza periódica del filtro Y1 para proteger la trampa termodinámica S1, por su alto valor y funcionalidad.

Dado que el condensado producido por la Unidad de Transferencia de Calor no tiene una línea de retorno hacia el caldero se debe procurar retornar la mayor cantidad al tanque de condensado por economía del Laboratorio en cuanto a la producción de agua acondicionada para la alimentación a la caldera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Crane. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.* México : McGraw-Hill.

Geankoplis, Christie J. 1998. *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias.* Tercera. México : CECSA, 1998.

Holman, J. P. 1999. *Transferencia de Calor.* México : McGraw Hill, 1999.

Incropera, Frank P. y DeWitt, David P. 1996. *Fundamentos de Transferencia de Calor.* México : Prentice Hall, 1996.

Kern, Donald Q. 1999. *Procesos de Transferencia de Calor.* México : Compañía Editorial Continental, 1999.

Levenspiel, O. 1993. *Flujo de fluidos e intercambio de calor.* Barcelona : Reverté, 1993.

McCabe, Warren L., Smith, Julian C. y Harriott, Peter. 1991. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.* Cuarta. Madrid : McGraw-Hill, 1991.

ANEXOS

Tablas usadas en el diseño de la UTC

A.2.11 Propiedades de transferencia de calor del agua líquida
(UNIDADES SI)

T (°C)	T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \times 10^3$ (Pa·s, o kg/m·s)	k (W/m·K)	N_{Pr}	$\beta \times 10^4$ (1/K)	$(g\beta\rho^2/\mu^2) \times 10^{-8}$ (1/K·m ³)
0	273.2	999.6	4.229	1.786	0.5694	13.3	-0.630	
15.6	288.8	998.0	4.187	1.131	0.5884	8.07	1.44	10.93
26.7	299.9	996.4	4.183	0.860	0.6109	5.89	2.34	30.70
37.8	311.0	994.7	4.183	0.682	0.6283	4.51	3.24	68.0
65.6	338.8	981.9	4.187	0.432	0.6629	2.72	5.04	256.2
93.3	366.5	962.7	4.229	0.3066	0.6802	1.91	6.66	642
121.1	394.3	943.5	4.271	0.2381	0.6836	1.49	8.46	1300
148.9	422.1	917.9	4.312	0.1935	0.6836	1.22	10.08	2231
204.4	477.6	858.6	4.522	0.1384	0.6611	0.950	14.04	5308
260.0	533.2	784.9	4.982	0.1042	0.6040	0.859	19.8	11030
315.6	588.8	679.2	6.322	0.0862	0.5071	1.07	31.5	19260

A.2-12 Propiedades de transferencia de calor del vapor de agua a 101.32 kPa (1 atm abs)

UNIDADES SI

T (°C)	T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \times 10^3$ (Pa·s, o kg/m·s)	k (W/m·K)	N_{Pr}	$\beta \times 10^3$ (1/K)	$g\beta\rho^2/\mu^2$ (1/K·m ³)
100.0	373.2	0.596	1.888	1.295	0.02510	0.96	2.68	0.557×10^8
148.9	422.1	0.525	1.909	1.488	0.02960	0.95	2.38	0.292×10^8
204.4	477.6	0.461	1.934	1.682	0.03462	0.94	2.09	0.154×10^8
260.0	533.2	0.413	1.968	1.883	0.03946	0.94	1.87	0.0883×10^8
315.6	588.8	0.373	1.997	2.113	0.04448	0.94	1.70	52.1×10^5
371.1	644.3	0.341	2.030	2.314	0.04985	0.93	1.55	33.1×10^5
426.7	699.3	0.314	2.068	2.529	0.05556	0.92	1.43	21.6×10^5

Tabla 10-3 Relaciones de eficacia de cambiadores de calor

$$N = NUT = \frac{UA}{C_{\min}} \quad C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

Geometría de flujo	Relación
Doble tubería:	
Flujo paralelo	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-N(1+C)]}{1+C}$
Flujo a contracorriente	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-N(1-C)]}{1 - C \exp[-N(1-C)]}$
Flujo a contracorriente, $C = 1$	$\epsilon = \frac{N}{1+N}$
Flujo transversal	
Ambos fluidos sin mezclar	$\epsilon = 1 - \exp\left[\frac{\exp(-NC\eta) - 1}{C\eta}\right]$ donde $\eta = N^{-0.23}$
Ambos fluidos mezclados	$\epsilon = \left[\frac{1}{1 - \exp(-N)} + \frac{C}{1 - \exp(-NC)} - \frac{1}{N}\right]^{-1}$
C_{\max} mezclado, C_{\min} sin mezclar	$\epsilon = (1/C)\{1 - \exp[-C(1 - e^{-N})]\}$
C_{\max} sin mezclar, C_{\min} mezclado	$\epsilon = 1 - \exp\{-(1/C)[1 - \exp(-NC)]\}$
Chaqueta y tubo	
Un paso de chaqueta, 2, 4, 6 pasos de tubo	$\epsilon = 2 \left\{ 1 + C + (1 + C^2)^{1/2} \frac{\exp[-N(1+C^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-N(1+C^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
todos los cambiadores con $C = 0$	$\epsilon = 1 - e^{-N}$

Tabla 10-4 Relaciones de NUT para cambiadores de calor

$$C = C_{\min}/C_{\max}$$

ϵ = eficacia

$$N = \text{NUT} = UA/C_{\min}$$

Geometría de flujo	Relación
Doble tubería:	
Flujo paralelo	$N = \frac{-\ln [1 - (1 + C)\epsilon]}{1 + C}$
Flujo a contracorriente	$N = \frac{1}{C - 1} \ln \left(\frac{\epsilon - 1}{C\epsilon - 1} \right)$
Flujo a contracorriente, $C = 1$	$N = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon}$
Flujo transversal	
C_{\max} mezclado, C_{\min} sin mezclar	$N = -1 \ln \left[1 + \frac{1}{C} \ln (1 - C\epsilon) \right]$
C_{\max} sin mezclar, C_{\min} mezclado	$N = \frac{-1}{C} [1 + C \ln (1 - \epsilon)]$
Chaqueta y tubo	
Un paso de chaqueta, 2, 4, 6 pasos de tubo	$N = -(1 + C^2)^{-1/2} \ln \left[\frac{2/\epsilon - 1 - C}{2/\epsilon - 1 - C + (1 + C^2)^{1/2}} \right]$
Todos los cambiadores, $C = 0$	$N = -\ln (1 - \epsilon)$

TABLA 8. VALORES APROXIMADOS DE LOS COEFICIENTES TOTALES PARA DISEÑO. MS VALORES INCLUYEN UN FACTOR DE OBSTRUCCION TOTAL DE 0.003 Y CAIDA DE PRESION PERMISIBLE DE 5 A 10 LB/PLG² EN LA CORRIENTE QUE CONTROLE

Enfriadores

Fluido caliente	Fluido frío	U_D total
Agua	Agua	250-500 *
Metanol	Agua	250-500 *
Amoniaco	Agua	250-500 *
Soluciones acuosas	Agua	250-500 *
Sustancias orgánicas ligeras ¹	Agua	75-150
Sustancias orgánicas medias ²	Agua	50-125
Sustancias orgánicas pesadas ³	Agua	5-75
Gases	Agua	2-50
Agua	Salmuera	100-200
Sustancias orgánicas ligeras	Salmuera	40-100

Calentadores

Fluido caliente	Fluido frío	U_D total
Vapor de agua	Agua	200-700 °
Vapor de agua	Metanol	200-700 °
Vapor de agua	Amoniaco	200-700 °
Vapor de agua	Soluciones acuosas :	
Vapor de agua	menos de 2.0 cp	200-700
Vapor de agua	Más de 2.0 cp	100-500°
Vapor de agua	Sustancias orgánicas ligeras	SO-100
Vapor de agua	Sustancias orgánicas medias	100-200
Vapor de agua	Sustancias orgánicas pesadas	S-SO
Vapor de agua	Gases	5-50 °

Intercambiadores

Fluido caliente	Fluido frío	U_D total
Agua	Agua	250-500 °
Soluciones acuosas	Soluciones acuosas	250-500 °
Sustancias orgánicas ligeras	Sustancias orgánicas ligeras	40-75
Sustancias orgánicas medias	Sustancias orgánicas medias	20-60
Sustancias orgánicas pesadas	Sustancias orgánicas pesadas\	10-40
Sustancias orgánicas pesadas	Sustancias orgánicas ligeras	30-60
Sustancias orgánicas ligeras	Sustancias orgánicas pesadas/	10-40

VELOCIDADES RECOMENDADAS PARA AGUA Y VAPOR EN TUBERÍAS

(Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías – Crane)

Velocidades utilizadas para el flujo de agua en tuberías

Servicio	Velocidad
Alimentación de calderas	2.4 a 4.6 m/s (8 a 15 pie/s)
Succión de bombas y líneas de descarga	1.2 a 2.1 m/s (4 a 7 pie/s)
Servicios generales	1.2 a 3.0 m/s (4 a 10 pie/s)
Distribución de agua potable	hasta 2.1 m/s (7 pie/s)

Velocidades razonables para el flujo de vapor de agua en tuberías

Condiciones del vapor de agua	Presión bar (p) (libras/pulg ²)	Servicio	Velocidad razonable metros por minuto (pies por minuto) (V)
Saturado	0 a 1.7(0 a 29)	Calefacción (líneas cortas)	1200 a 1800 (4000 a 6000)
	mayor de 1.7 (mayor de 25)	Equipo centrales térmicas, tubería de proceso, etc.	1800 a 3000 (6000 a 10 000)
Sobrecalentado	mayor de 14 (mayor de 200)	Conexiones de calderas, turbinas, etc.	2000 a 6000 (7000 a 20 000)

DATOS TÉCNICOS DEL CALDERO Y TORRE DE ENFRIAMIENTO DE LOPU

(Diseño integral a escala piloto, de una unidad didáctica de evaporación de doble efecto de tubos verticales cortos, para el Laboratorio de Operaciones Unitarias del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales – ESPOL; Vodopivec Kuri A.; 2011)

TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO:

Datos de diseño:

Capacidad de enfriamiento: 30 toneladas de refrigeración.

Ventilador: axial de 800 mm diámetro, motor trifásico 3 hp, 220 V.

Tubería de alimentación agua: 50mm. diámetro nominal, hierro galvanizado, ced. 40.

Tubería de descarga de agua: 50mm. diámetro nominal, hierro galvanizado, ced. 40.

Tubería de agua de compensación: 15mm. diámetro nominal, hierro galvanizado, ced. 40.

Bomba de recirculación:

Potencia: 2 hp

Caudal máximo: 13.6 m³/h

Presión máxima de descarga: 310 kPa

Motor eléctrico: 1800 RPM, monofásico

Características estructurales:

Material de carcasa: Hierro galvanizado.

Tipo y material de empaques: Neopreno.

CALDERO PIROTUBULAR TIPO VERTICAL AUTOMATICO A DIESEL DE 15 HP, CONSTRUIDO BAJO NORMAS ASME:

Producción de vapor desde y hasta 100 °C de 235 Kg/h

Presión máxima de trabajo: 1000 kPa

Superficie de transferencia de calor: 5.6 metros²

Consumo máximo de diesel 2: 4.5 gal/h

Eficiencia térmica: 85%

Características estructurales:

Casco cilíndrico, flue y placas de planchas calidad ASTM 285°C

Acoples roscados para diferentes conexiones

Tuberías y accesorios de Fo. No. SCH 40 de 25mm. para el árbol de presión

Registros de mano de 80x100mm. con su respectiva empaquetadura de mano

Aislante del tipo CASTABLE, para el hogar de la caldera y el fondo del casco

Soporte de acero estructural tipo patín

SIMULACIÓN

Propiedades	Agua de red pública	Vapor (35 psia)	Película	Agua de enfriamiento
T_m (°C)	40	126	104	30
k (kJ/m-h-°C)	2,26	0,098	2,45	2,16
C_p (kJ/kg-°C)	4,18	2188	4,23	4,18
d (kg/m ³)	994,7	0,560	960	996,4
u (kg/m-h)	2,360	0,054	1,020	2,88

Geometría	Calentador	Enfriador
Longitud (m)	3	15
Tubería interior (IPS):		
Diámetro nominal (mm)	31,75	31,75
Cédula	40	40
Diámetro interior (mm)	35,05	35,05
Diámetro exterior (mm)	42,16	42,16
Área de flujo por tubo (cm ²)	9,68	9,68
Superficie por pie lineal (m ² /m)	0,133	0,133
Tubería exterior (IPS):		
Diámetro nominal (mm)	63,5	63,5
Cédula	40	40
Diámetro interior (mm)	62,71	62,71
Diámetro equivalente (m)	0,051	0,051
Área del ánulo (cm ²)	16,93	16,93
Área de transferencia de calor (m ²)	1,31	6,55

Calentador	Ts	MLDT
1	126	82
2	126	91
3	126	82
4	126	91

Enfriador	T1	T2	MLDT
1	56	30	12
2	40	30	8
3	56	30	17
4	40	30	11

CALENTADOR																
Flujos másicos		Calor transferido		Números adimensionales			Coeficientes de película (k/h·m²·°C)			Coeficientes globales (k/h·m²·°C)			Factor de obstrucción		Caida de presión (atm)	
Flujo másico de vapor (kg/h)	Flujo másico de agua (LPM)	Q (k/h)	MDDT (°C)	[Pr]	[Nu]	[hi]	ho	hio	Uc	Ud	Rd	Interior	Anulo			
20	80	131280	82	4,4	18411	107	6906	30870	5741	4841	0,0006	0,001	0,001			
50	20	131280	91	4,4	46028	223	14373	30870	11949	8615	0,0008	0,001	0,001			
60	20	131280	82	4,4	18411	107	6906	30870	5741	4841	0,0006	0,001	0,001			
60	50	131280	91	4,4	46028	223	14373	30870	11949	8615	0,0008	0,001	0,001			
				33556												
ENFRIADOR																
Flujos másicos		Calor transferido		Números adimensionales: interior			Coeficientes de película (k/h·m²·°C)			Coeficientes globales (k/h·m²·°C)			Factor de obstrucción		Caida de presión (atm)	
Flujo másico de agua (LPM)	Flujo másico de agua de enfriamiento (LPM)	Q (k/h)	MDDT (°C)	[Pr]	[Re]	[Nu]	hi	ho	hio	Uc	Ud	Rd	Interior	Anulo		
20	80	131280	12	4,4	18411	92	5959	11157	4954	3431	1632	0,0003	0,001	0,000		
50	80	131280	8	4,4	46028	192	12404	11157	10312	5359	2440	0,0002	0,001	0,000		
20	80	131280	17	4,4	18411	92	5959	11157	4954	3431	1182	0,0006	0,001	0,000		
50	80	131280	11	4,4	46028	192	12404	11157	10312	5359	1849	0,0004	0,001	0,000		
				Números adimensionales exterior												
				[Pr]	[Re]	[Nu]										
				5,6	50334	264										
				5,6	50334	264										
				5,6	50334	264										

PRUEBAS

Equations and References	
<p>The equations used to calculate the Liquid properties in this worksheet are shown below. The source for these equations and the constants in the Lookup Table used to make the calculations came from:</p> <p>Perry's Chemical Engineers' Handbook, Ch. 2, Physical and Chemical Data</p> <p>Links to the tables for each liquid property are given at the top of the worksheet.</p>	
<p>Density of water:</p> $\rho = 0.062428(MW)(17.863 + 58.606\tau^{0.35} - 95.396\tau^{2/3} + 213.89\tau - 141.26\tau^{4/3})$ <p>T is in K $\tau = 1 - T/647.096$ ρ is in lbm/ft³</p>	
<p>Density of liquids other than water:</p> $\rho = 0.062428(MW)(C1 + C2T + C3T^2 + C4T^3)$ <p>T is in K ρ is in lbm/ft³</p>	
<p>Viscosity of Liquids:</p> $\mu = 0.0208846 \exp[C1 + C2/T + C3(\ln T) + C4(T^{C5})]$ <p>T is in K, μ is in lbf-s/ft²</p>	
<p>Specific Heat of Liquids:</p> $Cp = 0.000238846(C1 - C2T + C3T^2 - C4T^3 + C5T^4)/18.015$ <p>T is in K Cp is in Btu/lbm-°F</p>	
<p>Thermal Conductivity of liquids</p> $k = 0.5778C1T^{C2}/(1 - C3/T + C4/T^2)$ <p>T is in K k is in Btu/hr-ft-°F</p>	

Constantes para las propiedades del agua (0 - 80°C)					
	C1	C2	C3	C4	C5
d	-13,851	0,64038	-0,00191	1,82E-06	18,015
u	-52,843	3703,6	5,866	-5,88E-29	10
cp	276370	-2090,1	8,125	-0,014116	9,37E-06
k	-0,432	5,73E-03	-8,08E-06	1,86E-09	-

Geometría	Calentador	Enfriador
<i>Longitud (m)</i>	2,9	14,5
<i>Tubería interior (IPS):</i>		
<i>Diámetro nominal (mm)</i>	31,75	31,75
<i>Cédula</i>	40	40
<i>Diámetro interior (mm)</i>	35,05	35,05
<i>Diámetro exterior (mm)</i>	42,16	42,16
<i>Área de flujo por tubo (cm²)</i>	9,68	9,68
<i>Superficie por pie lineal (m²/m)</i>	0,133	0,133
<i>Tubería exterior (IPS):</i>		
<i>Diámetro nominal (mm)</i>	63,5	63,5
<i>Cédula</i>	40	40
<i>Diámetro interior (mm)</i>	62,71	62,71
<i>Diámetro equivalente (m)</i>	0,051	0,051
<i>Área del ánulo (cm²)</i>	16,93	16,93
<i>Área de transferencia de calor (m²)</i>	1,27	6,33

PRUEBA 1

	Flujos másicos		
	m (LPM)	mv (kg/h)	M (LPM)
exp	30	75	40
teo	30,2	74,6	30,5



0	32.18	37.13	36.00	31.66	37.75	29.25	33.01	26.56	28.47
1	32.73	37.40	35.75	31.66	37.25	29.25	32.77	26.56	28.47
2	29.70	45.38	41.25	31.45	107.75	33.30	33.01	26.14	31.45
3	28.60	53.08	44.50	31.87	107.50	42.30	43.22	26.56	36.13
4	31.07	55.28	48.25	32.09	106.50	42.52	44.41	26.56	38.25
5	31.62	55.00	49.00	31.66	106.75	43.20	45.13	26.78	38.68
6	32.45	56.38	51.25	32.09	109.50	43.88	45.60	27.20	39.10
7	33.28	56.93	53.50	31.87	110.50	45.00	46.08	27.62	39.53
8	34.65	56.38	54.50	32.09	111.25	45.68	47.02	28.05	40.59
9	36.03	57.75	56.50	31.45	112.25	47.25	45.13	28.05	41.23
10	36.03	57.75	57.00	31.66	114.50	48.82	45.13	28.05	42.29
11	39.33	56.65	55.50	32.09	48.00	45.68	44.65	28.26	40.38
12	39.05	47.03	53.25	32.09	56.25	38.47	36.34	28.90	36.34
13	39.88	44.55	52.25	31.87	73.50	38.02	36.34	29.11	35.70
14	40.70	45.10	51.50	31.45	80.00	38.70	36.58	29.11	35.70
15	40.15	44.83	50.50	31.87	81.50	38.25	36.58	29.11	35.49
16	40.43	44.55	48.25	32.09	80.75	38.02	35.86	28.69	35.28
17	40.43	43.73	48.00	32.09	79.00	37.80	36.10	28.47	35.06
18	39.60	44.00	47.00	31.66	76.75	37.35	36.10	28.26	34.64
19	39.05	43.73	46.25	32.09	74.75	36.68	35.39	28.26	33.58
20	38.23	43.45	45.50	32.09	72.50	35.77	34.68	27.41	33.79
21	38.23	43.18	44.75	32.30	69.50	36.22	34.68	27.84	33.58
22	36.85	42.63	44.00	31.45	67.50	35.33	34.68	28.26	32.73
23	37.40	42.63	44.25	32.09	65.75	34.88	34.44	28.05	32.30

PRUEBA 2

	Flujos máscicos		
	m (LPM)	mv (kg/h)	M (LPM)
exp	45	95	75
teo	44,4	96,4	34,9



COM6

```

0      35.48   39.60   39.50   33.97   47.75   31.95   35.50   26.99   30.39
1      32.45   45.38   45.00   33.52   104.00   40.05   40.50   27.20   34.43
2      32.73   49.23   47.00   33.97   103.50   41.40   43.75   27.20   36.13
3      33.83   50.05   49.00   33.52   104.75   41.85   44.75   26.99   36.98
4      35.75   52.25   50.00   34.20   105.00   42.52   45.50   27.41   36.98
5      35.48   53.90   51.00   34.20   107.50   43.88   46.50   28.05   38.25
6      37.40   55.55   53.00   34.65   107.25   44.77   47.75   27.62   39.10
7      38.78   56.10   53.50   33.97   108.00   45.45   48.50   28.69   39.74
8      39.05   56.93   55.25   34.65   110.25   46.35   49.25   28.90   39.74
9      40.43   58.30   56.25   33.97   110.00   46.80   49.50   29.11   40.80
10     40.70   59.40   57.00   34.43   111.00   47.70   50.00   29.32   41.44
11     40.70   60.78   58.25   34.65   109.50   47.70   50.50   28.69   41.23
12     43.18   61.05   58.00   34.43   106.50   48.38   50.00   29.32   41.65
    
```

PRUEBA 3

	Flujos máscicos		
	m (LPM)	mv (kg/h)	M (LPM)
exp	55	105	85
teo	52,1	110,9	78,3

	COM6								
0	33.83	37.13	39.75	34.20	66.75	31.27	35.50	27.20	29.96
1	32.18	46.48	44.50	34.43	102.25	40.27	43.25	26.56	35.06
2	33.00	48.13	46.75	34.43	99.75	40.95	44.50	26.99	35.70
3	34.38	49.78	48.50	34.43	100.50	41.63	44.75	26.99	36.34
4	36.30	51.15	50.50	33.97	102.50	42.75	45.75	27.62	37.19
5	36.30	52.53	51.25	34.20	102.00	43.88	45.50	27.84	37.61
6	37.68	53.90	52.00	33.97	103.75	44.55	46.50	28.26	37.83
7	37.68	54.73	54.00	33.97	104.75	45.00	47.75	28.69	39.10
8	39.05	56.10	54.50	34.20	103.75	45.68	48.00	28.69	39.95
9	40.15	57.20	55.75	34.43	107.00	46.35	48.25	28.90	40.38
10	39.88	58.03	57.00	34.20	107.75	47.47	49.50	29.32	41.23

	COM6								
0	44.00	60.78	59.75	34.43	104.50	48.38	47.97	30.39	39.80
1	44.00	61.60	60.75	34.20	106.00	48.82	48.21	30.60	40.00
2	45.10	62.70	61.50	34.43	109.00	49.50	48.69	30.81	39.80
3	45.10	62.98	60.75	34.20	109.50	50.18	49.64	30.60	41.00
4	45.93	62.70	61.25	33.75	110.25	50.40	49.40	30.81	41.00
5	45.38	62.98	61.75	33.97	111.75	50.63	49.88	30.39	40.20
6	45.10	63.25	62.00	34.65	110.25	50.85	50.59	30.81	40.60
7	46.20	62.98	62.00	35.10	108.50	49.72	49.88	30.81	40.20
8	46.48	62.98	61.75	34.88	106.75	49.95	50.11	30.81	40.00
9	45.93	62.70	61.50	35.33	107.50	50.40	49.88	30.81	40.40
10	45.65	63.25	62.25	35.10	108.75	50.63	49.88	30.81	40.20
11	45.93	63.80	62.25	35.10	109.25	50.63	50.35	30.39	40.60
12	46.48	63.80	63.00	35.10	109.75	50.85	50.59	30.60	41.20
13	46.20	64.35	62.50	35.33	110.25	51.52	50.83	30.81	41.00
14	46.75	64.62	63.00	35.33	111.25	52.20	51.30	30.81	41.60
15	47.03	64.90	63.50	35.10	113.75	52.43	51.77	30.60	42.00
16	48.68	64.90	64.00	35.10	110.25	52.20	48.69	30.39	41.80
17	48.40	64.62	64.50	35.33	109.00	51.97	48.21	30.81	41.20
18	48.95	64.90	63.50	35.10	108.00	51.52	48.45	30.60	40.80
19	48.40	65.18	63.00	35.33	109.50	51.75	48.69	31.03	41.80
20	47.85	64.90	63.00	35.33	109.25	52.43	48.69	31.03	41.80
21	48.13	65.45	63.50	34.88	109.75	52.43	49.16	30.81	42.00
22	48.40	65.72	63.75	35.55	109.75	52.65	49.16	31.24	42.20
23	50.60	55.83	60.75	35.55	78.25	46.13	43.94	31.45	38.20
24	49.78	53.35	58.50	35.33	88.00	44.55	41.80	31.66	37.00
25	48.68	52.25	56.00	35.10	88.50	42.97	40.14	31.24	36.20
26	47.03	51.15	54.25	35.33	88.00	42.75	39.66	30.81	35.60
27	44.28	50.60	53.00	35.10	85.50	41.85	40.14	30.81	35.00

PRUEBA 4

	Flujos máscicos		
	m (LPM)	mv (kg/h)	M (LPM)
exp	50	100	80
teo	50,4	99,2	66,4

0	42.63	58.03	56.00	27.84	109.25	46.57	46.31	28.47	37.60
1	42.63	59.95	56.75	27.62	108.50	47.47	47.26	28.47	38.20
2	44.00	60.78	57.75	29.54	110.00	47.25	47.50	28.90	39.00
3	44.83	61.60	57.75	31.72	110.00	48.38	48.21	28.90	39.80
4	45.10	61.33	59.00	31.72	107.25	48.38	48.21	29.11	39.40
5	47.03	61.33	58.75	31.95	105.50	47.70	48.69	28.90	39.20
6	46.75	61.33	59.50	29.75	106.75	47.93	47.97	29.54	39.40
7	47.03	62.15	60.00	32.18	106.25	48.15	48.93	29.32	39.60
8	47.85	61.88	60.00	32.63	108.25	48.60	49.16	29.32	39.60
9	47.03	62.70	60.25	32.85	111.00	48.82	49.64	29.54	39.80
10	47.03	63.80	60.75	32.63	110.25	49.50	49.88	29.54	40.00
11	47.03	64.08	61.25	32.18	110.75	49.50	50.35	29.32	40.00
12	47.03	64.08	61.25	31.95	112.75	49.50	51.06	29.75	40.40
13	47.03	64.08	61.75	32.85	107.75	50.18	51.06	29.96	40.80
14	48.68	64.35	61.25	33.30	106.50	49.50	51.06	29.96	41.00
15	48.68	63.80	61.25	33.30	107.00	49.27	50.35	30.18	40.40
16	49.23	62.98	61.50	33.30	107.25	49.05	50.35	30.60	40.60
17	47.58	63.80	61.75	33.75	107.75	49.27	50.59	30.18	40.40
18	48.13	64.62	61.50	32.63	108.75	49.95	51.06	30.39	40.60
19	47.30	65.18	61.75	33.08	109.75	50.18	51.54	30.39	41.40
20	48.13	64.90	63.00	33.30	109.50	50.63	51.54	30.81	41.40
21	48.13	65.72	63.25	33.08	111.25	50.63	51.77	30.81	41.00
22	48.13	65.72	62.25	32.63	108.75	50.40	51.77	30.81	41.60
23	48.95	65.45	62.75	32.85	105.25	49.95	51.54	30.81	41.20
24	50.05	64.90	61.75	32.85	104.00	50.18	50.83	30.60	41.20
25	49.23	65.18	62.25	32.40	105.00	49.72	50.83	30.60	41.00
26	49.50	65.18	61.75	32.18	106.25	50.63	51.30	31.03	41.40
27	48.95	65.45	61.75	29.75	107.50	50.85	51.30	31.03	41.00
28	49.23	65.45	62.25	29.11	109.00	50.85	51.77	31.03	41.60
29	48.68	65.72	62.00	28.26	110.25	50.85	51.77	31.03	41.20
30	48.13	66.27	63.25	28.69	111.00	51.52	52.01	31.45	41.60
31	49.50	66.00	62.75	28.90	110.00	51.30	52.25	31.03	41.80
32	50.05	65.18	63.00	28.26	106.75	50.40	52.01	31.24	41.80
33	49.23	65.45	62.50	28.90	106.00	50.63	51.77	31.66	41.40
34	49.78	65.72	62.75	29.11	105.25	50.63	51.30	31.24	41.20

3	44.83	61.60	57.75	31.72	110.00	48.38	48.21	28.90	39.80
4	45.10	61.33	59.00	31.72	107.25	48.38	48.21	29.11	39.40
5	47.03	61.33	58.75	31.95	105.50	47.70	48.69	28.90	39.20
6	46.75	61.33	59.50	29.75	106.75	47.93	47.97	29.54	39.40
7	47.03	62.15	60.00	32.18	106.25	48.15	48.93	29.32	39.60
8	47.85	61.88	60.00	32.63	108.25	48.60	49.16	29.32	39.60
9	47.03	62.70	60.25	32.85	111.00	48.82	49.64	29.54	39.80
10	47.03	63.80	60.75	32.63	110.25	49.50	49.88	29.54	40.00
11	47.03	64.08	61.25	32.18	110.75	49.50	50.35	29.32	40.00
12	47.03	64.08	61.25	31.95	112.75	49.50	51.06	29.75	40.40
13	47.03	64.08	61.75	32.85	107.75	50.18	51.06	29.96	40.80
14	48.68	64.35	61.25	33.30	106.50	49.50	51.06	29.96	41.00
15	48.68	63.80	61.25	33.30	107.00	49.27	50.35	30.18	40.40
16	49.23	62.98	61.50	33.30	107.25	49.05	50.35	30.60	40.60
17	47.58	63.80	61.75	33.75	107.75	49.27	50.59	30.18	40.40
18	48.13	64.62	61.50	32.63	108.75	49.95	51.06	30.39	40.60
19	47.30	65.18	61.75	33.08	109.75	50.18	51.54	30.39	41.40
20	48.13	64.90	63.00	33.30	109.50	50.63	51.54	30.81	41.40
21	48.13	65.72	63.25	33.08	111.25	50.63	51.77	30.81	41.00
22	48.13	65.72	62.25	32.63	108.75	50.40	51.77	30.81	41.60
23	48.95	65.45	62.75	32.85	105.25	49.95	51.54	30.81	41.20
24	50.05	64.90	61.75	32.85	104.00	50.18	50.83	30.60	41.20
25	49.23	65.18	62.25	32.40	105.00	49.72	50.83	30.60	41.00
26	49.50	65.18	61.75	32.18	106.25	50.63	51.30	31.03	41.40
27	48.95	65.45	61.75	29.75	107.50	50.85	51.30	31.03	41.00
28	49.23	65.45	62.25	29.11	109.00	50.85	51.77	31.03	41.60
29	48.68	65.72	62.00	28.26	110.25	50.85	51.77	31.03	41.20
30	48.13	66.27	63.25	28.69	111.00	51.52	52.01	31.45	41.60
31	49.50	66.00	62.75	28.90	110.00	51.30	52.25	31.03	41.80
32	50.05	65.18	63.00	28.26	106.75	50.40	52.01	31.24	41.80
33	49.23	65.45	62.50	28.90	106.00	50.63	51.77	31.66	41.40
34	49.78	65.72	62.75	29.11	105.25	50.63	51.30	31.24	41.20
35	49.78	65.72	62.75	29.32	107.00	50.40	51.06	31.24	41.20
36	48.68	65.72	62.00	29.32	107.75	52.43	52.49	31.66	41.40
37	48.95	65.45	62.50	28.90	109.00	52.43	52.96	31.45	41.40
38	50.05	65.72	62.50	29.11	109.00	52.65	53.91	31.66	41.60
39	50.05	66.55	63.00	29.75	110.75	52.88	53.68	31.45	41.40

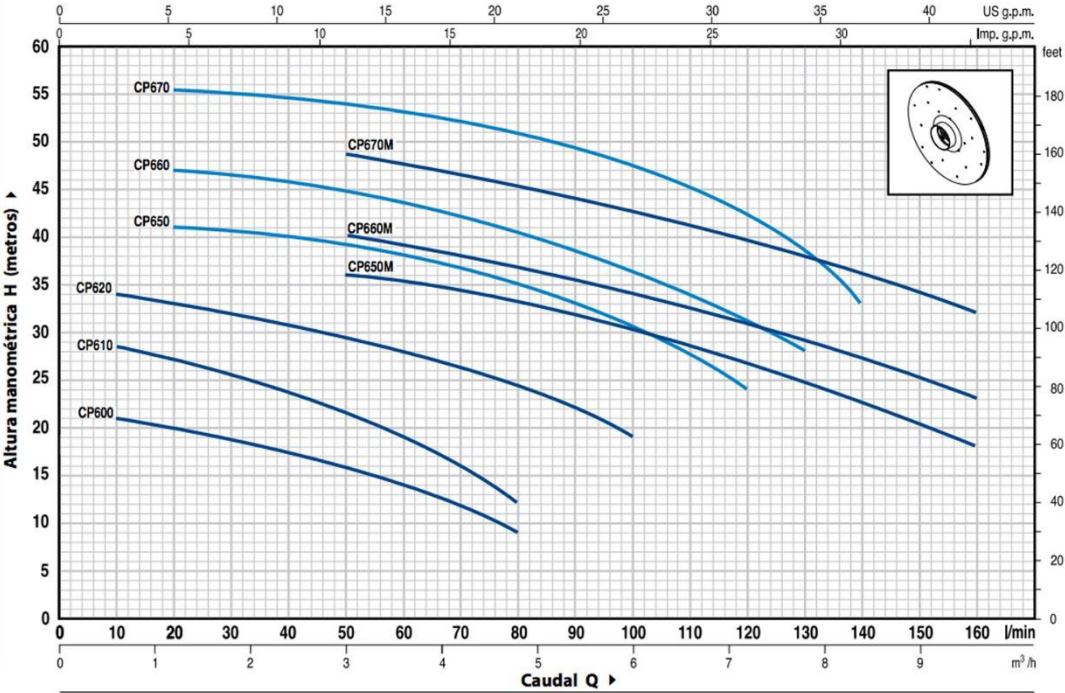


8	47.85	61.88	60.00	32.63	108.25	48.60	49.16	29.32	39.60
9	47.03	62.70	60.25	32.85	111.00	48.82	49.64	29.54	39.80
10	47.03	63.80	60.75	32.63	110.25	49.50	49.88	29.54	40.00
11	47.03	64.08	61.25	32.18	110.75	49.50	50.35	29.32	40.00
12	47.03	64.08	61.25	31.95	112.75	49.50	51.06	29.75	40.40
13	47.03	64.08	61.75	32.85	107.75	50.18	51.06	29.96	40.80
14	48.68	64.35	61.25	33.30	106.50	49.50	51.06	29.96	41.00
15	48.68	63.80	61.25	33.30	107.00	49.27	50.35	30.18	40.40
16	49.23	62.98	61.50	33.30	107.25	49.05	50.35	30.60	40.60
17	47.58	63.80	61.75	33.75	107.75	49.27	50.59	30.18	40.40
18	48.13	64.62	61.50	32.63	108.75	49.95	51.06	30.39	40.60
19	47.30	65.18	61.75	33.08	109.75	50.18	51.54	30.39	41.40
20	48.13	64.90	63.00	33.30	109.50	50.63	51.54	30.81	41.40
21	48.13	65.72	63.25	33.08	111.25	50.63	51.77	30.81	41.00
22	48.13	65.72	62.25	32.63	108.75	50.40	51.77	30.81	41.60
23	48.95	65.45	62.75	32.85	105.25	49.95	51.54	30.81	41.20
24	50.05	64.90	61.75	32.85	104.00	50.18	50.83	30.60	41.20
25	49.23	65.18	62.25	32.40	105.00	49.72	50.83	30.60	41.00
26	49.50	65.18	61.75	32.18	106.25	50.63	51.30	31.03	41.40
27	48.95	65.45	61.75	29.75	107.50	50.85	51.30	31.03	41.00
28	49.23	65.45	62.25	29.11	109.00	50.85	51.77	31.03	41.60
29	48.68	65.72	62.00	28.26	110.25	50.85	51.77	31.03	41.20
30	48.13	66.27	63.25	28.69	111.00	51.52	52.01	31.45	41.60
31	49.50	66.00	62.75	28.90	110.00	51.30	52.25	31.03	41.80
32	50.05	65.18	63.00	28.26	106.75	50.40	52.01	31.24	41.80
33	49.23	65.45	62.50	28.90	106.00	50.63	51.77	31.66	41.40
34	49.78	65.72	62.75	29.11	105.25	50.63	51.30	31.24	41.20
35	49.78	65.72	62.75	29.32	107.00	50.40	51.06	31.24	41.20
36	48.68	65.72	62.00	29.32	107.75	52.43	52.49	31.66	41.40
37	48.95	65.45	62.50	28.90	109.00	52.43	52.96	31.45	41.40
38	50.05	65.72	62.50	29.11	109.00	52.65	53.91	31.66	41.60
39	50.05	66.55	63.00	29.75	110.75	52.88	53.68	31.45	41.40
40	50.60	66.55	62.25	28.47	109.75	53.77	54.15	31.03	42.00
41	52.80	64.90	61.00	27.41	108.00	52.65	53.44	38.89	36.80
42	52.80	64.62	59.75	27.84	106.00	52.20	53.20	39.10	36.80
43	52.25	64.90	60.50	28.05	106.00	51.97	52.72	38.68	36.40
44	51.43	64.62	60.25	27.84	106.75	52.65	52.72	38.46	37.20

FICHAS TÉCNICAS

BOMBA

CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES 60 Hz n= 3450 1/min HS= 0 m



MODELO		POTENCIA		Q																	
Monofásica	Trifásica	kW	HP		0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0	6.6	7.2	7.8	8.4	9.0	9.6
CPm 600	CP 600	0.37	0.50	H metros	22	21	20	18.5	17	15.5	14	12	9								
CPm 610	CP 610	0.60	0.85		30	28.5	27	25.5	23.5	21.5	19	16	12								
CPm 620	CP 620	0.75	1		35	34	33	31.5	30.5	29.5	28	26.5	24.5	22	19						
CPm 650	CP 650	1.1	1.5		42	41.5	41	40.5	39.5	39	38	36.5	35	33	30	27	24				
CPm 660	CP 660	1.5	2		48	47.5	47	46.5	46	45	43.5	42	40.5	38.5	36	33.5	31	28			
CPm 670	CP 670	2.2	3		57	56.5	55.5	55	54	53.5	53	52	50.5	49.5	47	45	42.5	38	33		
CPm 650M	CP 650M	1.1	1.5		39	38.5	38	37	36.5	36	35	34	33	32	30	28.5	26.5	24.5	22.5	20	18
CPm 660M	CP 660M	1.5	2		43	42.5	42	41	40.5	40	39	37.5	36.5	35	34	32.5	31	29	27	25	23
CPm 670M	CP 670M	2.2	3		51	50.5	50.5	50	49.5	48.5	47.5	46.5	45	44	42.5	41	39.5	37.5	36	34	32

Q = Caudal H = Altura manométrica total HS = Altura de aspiración Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO 9906 Grade 3.

SOLDADURA

ELECTRODO 308L (AWS E 308L)

Ficha Técnica

Fecha de Descarga : 10 de Mayo del 2015

Marca : INDURA
Modelo : 308L
SAP : 2000325-2000326-2000327
Proceso : MIG (ACERO INOXIDABLE)



308L (AWS E 308L) 5/32" 2.4mm 2000325
308L (AWS E 308L) 1/8" 3.2mm 2000326
308L (AWS E 308L) 5/32" 4.0mm 2000327



Presentación

Características

El electrodo 308L posee un revestimiento rutilico, lo que lo hace apto para soldar con CA o CC, electrodo positivo. Este electrodo se caracteriza por un arco estable de transferencia spray, cuyo depósito es de excelente forma y apariencia. La escoria se desprende fácilmente, además de tener muy buena reanudación de arco por lo que se aconseja usarlo en soldadura intermitente. El depósito es de acero inoxidable austenítico.

Especificaciones

Para soldadura de aceros inoxidables que contienen 16-21% Cr, 8-13% Ni, aceros estabilizados y no estabilizados (302, 304, 304L, 304LN, 308, 321, 347). Fácil remoción de escoria

Usos

El electrodo 308L ha sido diseñado principalmente para soldar aceros inoxidables austeníticos con un contenido extrabajo de carbono. El contenido máximo de 0,04% de carbono según normas AWS, evita la formación de carburos y la precipitación de ellos en los bordes de grano, dando así una excelente protección contra la corrosión intergranular. Se recomienda especialmente para aplicaciones resistentes a la corrosión, cuando hay posibilidad de "picadura", producida por los ácidos sulfúricos y sulfurosos, sulfito y soluciones de celulosa.

Aplicaciones

Aceros inox. 304, 304L, 308, 308L, 321, 347, 348. Equipos químicos y petroquímicos. Estanques que contengan productos químicos corrosivos.

Puntos de Venta

Producto disponible en locales INDURAmarket y Agentes autorizados INDURA

Información Técnica

Composición Química Típica del Metal Depositado

C 0,02%; Mn 0,63%; Si 0,76%; P 0,025%; S 0,008%; Cr 18,7%; Ni

10,0%; Mo 0,18%

Hojas de Seguridad y Otros Archivos

Ficha Técnica INDURA 308L

Página 1 de 2

INDURA S.A.
Ecuador Casa Matriz
Km. 14,5 Vía a Daule
Teléfonos: Central Telefónica Matriz: (59 34) 2597010

INDURA

Tabla Técnica

Análisis Típico del metal depositado (% en peso)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
0.02	0.90	0.85	0.02	0.02	19.0	9.50	0.05

Propiedades Mecánicas Típicas del Metal Depositado

Esf. Fluencia en 0.2%, MPa	Esf. M. de Tracción, MPa	Elongación (L=4d), %	E. Absorbida Ch-v
425	580	47	40 J : -100 C

Parámetros de Soldadura y Datos

Diámetro, mm (plg)	2.4 (3/32)	3.2 (1/8)	4.0 (5/32)	4.8 (3/16)
Longitud, mm (plg)	300 (12)	350 (14)	350 (14)	350 (14)
Int., de Corr., A	60 - 90	90 - 120	120 - 150	150 - 190
Nº elect/Kg	59	31	21	10

Secado

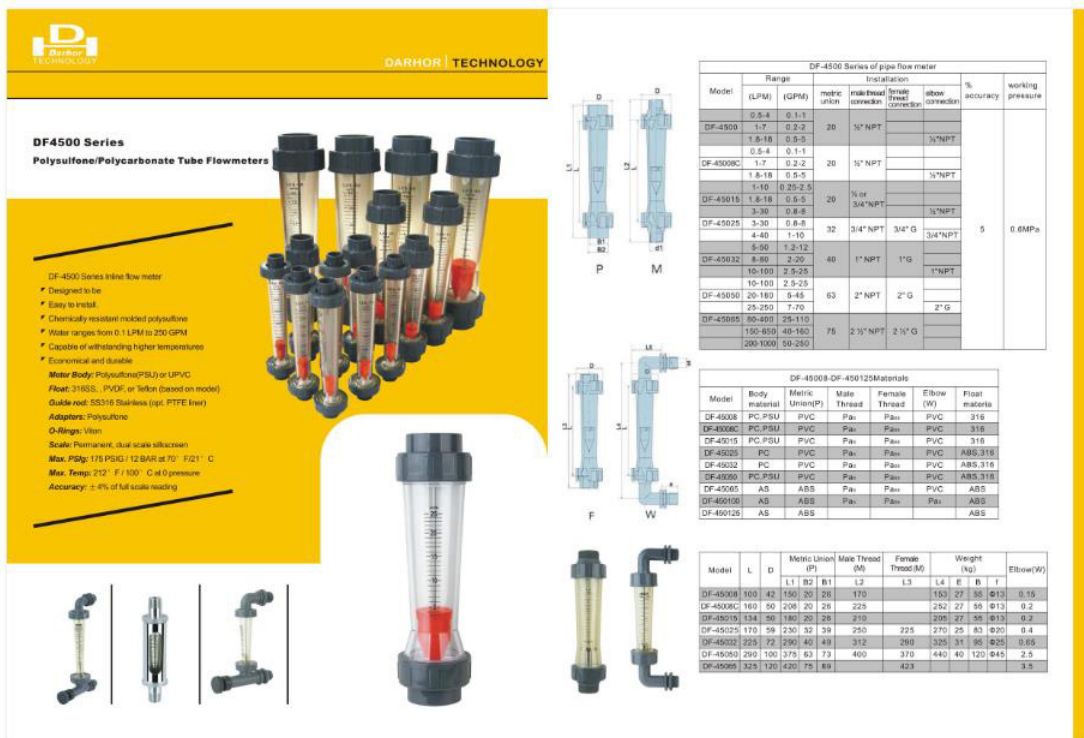
Mínimo 1 hora a 300 °C

Posición de Soldadura			CCEP - CA
-----------------------	---	---	-----------



Posición de Soldadura			CCEP - CA
-----------------------	---	---	-----------

ROTÁMETROS



TUBERÍAS



TUBERÍA EN ACERO INOXIDABLE

Geroneto
Importadora de materiales industriales



TUBERÍA EN ACERO INOXIDABLE 304

Características Generales:
Calidad: 304
Acabado: Acero Inoxidable
Longitud: 6 metros
Aplicaciones: Pasamanos, marcos para puertas y ventanas, implementos para el manejo de alimentos y demás trabajos para la arquitectura.

• 1 Tubos Cuadrados

Denominación	Espe- sor e	Peso
pulg.	mm	Kg/6m
3/4x3/4"	20	1.20
1x1"	25	1.20
1x1"	25	1.50
1 1/4x1 1/4"	30	1.20
1 1/4x1 1/4"	30	1.50
1 1/2 x1 1/2"	40	1.20
1 1/2 x1 1/2"	40	1.50
1 1/2 x1 1/2"	40	2.00
2x2"	50	1.50
2x2"	50	2.00

• 2 Tubos Redondos

Denominación	Diámetro Exterior	Espe- sor e	Peso
pulg.	mm	mm	Kg/6m
1/2"	12.70	1.00	1.72
1/2"	12.70	1.20	2.06
5/8"	15.90	1.20	2.54
3/4"	19.10	1.00	2.52
3/4"	19.10	1.20	3.03
3/4"	19.10	1.50	3.90
7/8"	22.20	1.00	2.97
7/8"	22.20	1.20	3.72
7/8"	22.20	1.50	4.45
1"	25.40	1.20	4.11
1"	25.40	1.50	5.14
1"	25.40	2.00	6.53
1 1/4"	31.80	1.20	5.20
1 1/4"	31.80	1.50	6.51
1 1/4"	31.80	2.00	8.31
1 1/2"	38.10	1.20	6.27
1 1/2"	38.10	1.50	7.86
1 1/2"	38.10	2.00	10.06
2"	50.80	1.20	8.42
2"	50.80	1.50	10.59
2"	50.80	2.00	13.58
2 1/2"	63.50	2.00	17.11
2 7/8"	70.50	2.00	20.69
3"	76.20	2.00	20.63
4"	101.60	2.00	27.68



www.geroneto.com

• 3 Tubos Rectangular

Denominación	Espe- sor e	Peso
pulg.	mm	Kg/6m
1 1/2x3/4"	40	1.20
1 1/2x3/4"	40	1.50
2x1"	50	1.20
2x1"	50	1.50

TUBERÍA EN ACERO INOXIDABLE 201

Características Generales:
Calidad: 201
Acabado: Acero Inoxidable Brillante / Pulido
Longitud: 5.80 metros
Aplicaciones: Pasamanos para interiores, trabajos decorativos, marcos para puertas y ventanas, paneles internos, fregaderos y demás trabajos para la arquitectura.

• 1 Tubos Redondos Brillante

Denominación	Espe- sor e	Peso
pulg.	mm	Kg/5.80m
1/2"	1.20	2.00
7/8"	1.20	3.35
1"	1.20	3.86
1 1/4"	1.50	6.08
1 1/2"	1.20	5.68
1 1/2"	1.50	7.30
2"	1.50	9.82
2"	2.00	12.97
2 1/2"	2.00	16.42
3"	2.00	19.73
4"	2.00	26.50

• 2 Tubos Redondos Pulido

Denominación	Espe- sor e	Peso
pulg.	mm	Kg/5.80m
1/2"	1.20	2.00
5/8"	1.20	2.34
3/4"	1.20	2.86
3/4"	1.50	3.51
7/8"	1.50	4.12
1"	1.20	3.86
1"	1.50	4.77
1"	2.00	6.22
1 1/4"	1.20	4.92
1 1/2"	1.20	5.88
1 1/2"	1.50	7.30
1 1/2"	2.00	9.60
2"	1.20	7.91
2"	1.50	9.81
2"	2.00	12.97
2 1/2"	2.00	16.33
3"	2.00	19.75
4"	2.00	26.50

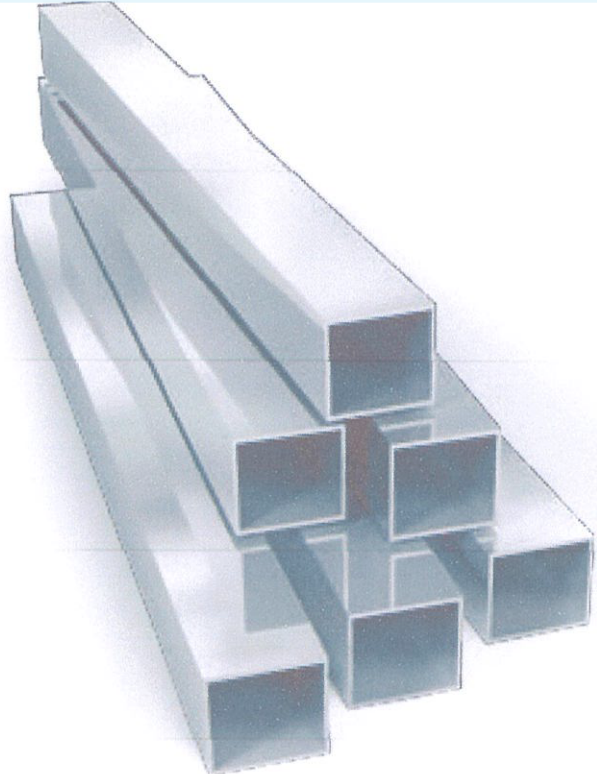


Geroneto
Importadora de materiales industriales

Matriz:
Bosque Alifan # 2401 y Vías Galindo.
Tel: (593-4) 2445 857 / 5256 / 5269

Sucursal:
Mapasingue Este Ave. 1ra. #322 y Calle 2da.
Tel: (593-4) 200 3754 - 600 5211 / 5212

www.geroneto.com



TUBERÍA EN ACERO INOXIDABLE 304

Características Generales:

Calidad: 304

Acabado: Acero Inoxidable

Longitud: 6 metros

Aplicaciones: Pasamanos, marcos para puertas y ventanas, implementos para el manejo de alimentos y demás trabajos para la arquitectura.

• 1 Tubos Cuadrados

	Denominación		Espesor e	Peso
pulg.	mm		mm	Kg/6m
3/4X3/4"	20	20	1.20	3.91
1X1"	25	25	1.20	5.20
1X1"	25	25	1.50	6.51
1 1/4X1 1/4"	30	30	1.20	6.67
1 1/4X1 1/4"	30	30	1.50	8.38
1 1/2 X1 1/2"	40	40	1.20	8.04
1 1/2 X1 1/2"	40	40	1.50	10.12
1 1/2 X1 1/2"	40	40	2.00	12.97
2X2"	50	50	1.50	13.57
2X2"	50	50	2.00	17.44

• 2 Tubos Redondos

Denominación	Diámetro Exterior	Espesor e	Peso
pulg.	mm	mm	Kg/6m
1/2"	12.70	1.00	1.72
1/2"	12.70	1.20	2.06
5/8"	15.90	1.20	2.54
3/4"	19.10	1.00	2.52
3/4"	19.10	1.20	3.03
3/4"	19.10	1.50	3.90
7/8"	22.20	1.00	2.97
7/8"	22.20	1.20	3.72
7/8"	22.20	1.50	4.45
1"	25.40	1.20	4.11
1"	25.40	1.50	5.14
1"	25.40	2.00	6.53
1 1/4"	31.80	1.20	5.20
1 1/4"	31.80	1.50	6.51
1 1/4"	31.80	2.00	8.31
1 1/2"	38.10	1.20	6.27
1 1/2"	38.10	1.50	7.86
1 1/2"	38.10	2.00	10.06
2"	50.80	1.20	8.42
2"	50.80	1.50	10.59
2"	50.80	2.00	13.58
2 1/2"	63.50	2.00	17.11
2 7/8"	70.50	2.00	20.69
3"	76.20	2.00	20.63
4"	101.60	2.00	27.68

