

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TÍTULO DEL PROYECTO

“INGENIERÍA CONCEPTUAL, BÁSICA Y DE DETALLE DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR TIPO TUBO CONCÉNTRICO Y MULTITUBOS PARA FLUJO PARALELO Y CONTRAFLUJO UTILIZANDO COMO FLUIDOS DE TRABAJO ACEITES API Y AGUA PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL DECEM.”

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

REALIZADO POR:

JORGE PATRICO MEJÍA DUMAN

JUAN FERNANDO PERÉZ GUFFANTTE

DIRECTOR: ING. ERNESTO SORIA

CODIRECTOR: ING. FREDDY ORDÓÑEZ

Sangolquí, 2011-07-06

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El Proyecto, “**INGENIERÍA CONCEPTUAL, BÁSICA Y DE DETALLE DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR TIPO TUBO CONCÉNTRICO Y MULTITUBOS PARA FLUJO PARALELO Y CONTRAFLUJO UTILIZANDO COMO FLUIDOS DE TRABAJO ACEITES API Y AGUA PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL DECEM.**” fue realizado en su totalidad por el Señor Jorge Patricio Mejía Dumani y el señor Juan Fernando Pérez Guffante , como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Ernesto Soria
DIRECTOR

Ing. Freddy Ordóñez
CODIRECTOR

Sangolquí, 2011 – 07 –06

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“INGENIERÍA CONCEPTUAL, BÁSICA Y DE DETALLE DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR TIPO TUBO CONCÉNTRICO Y MULTITUBOS PARA FLUJO PARALELO Y CONTRAFLUJO UTILIZANDO COMO FLUIDOS DE TRABAJO ACEITES API Y AGUA PARA EL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DEL DECEM”

ELABORADO POR:

Jorge P. Mejía

Fernando J. Pérez

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**Ing. Xavier Sánchez
DIRECTOR DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA MECÁNICA**

Sangolquí, 2011 – 07 –06

DEDICATORIA

A mi padre Patricio por haberme enseñado valores y ser un pilar principal no solo en mis estudios sino en toda mi vida y siempre con su impecable ejemplo.

A mi madre querida Salomé por ser siempre constante por enseñarme a siempre ser una mejor persona y por estar a mi lado como amiga para toda situación.

A mis hermanos Yessenia y Gabriel por el apoyo incondicional que nunca faltó.

Jorge P. Mejía

Mis triunfos, logros y éxitos han sido gracias a mi familia y es por eso que dedico mi tesis a mi papa Fernando quien ha sido mi ejemplo a seguir como una persona llena de valores y virtudes, gracias a él en los problemas he logrado salir y aprender el valor de la vida. A mi mama Mónica por ser la mujer que desde un principio no hizo otra cosa que brindarme todo su apoyo. A mi abuelita Faby ya que ha sido la mujer que ha hecho todo lo posible por que yo sea un profesional y termine bien este proyecto de grado, a mi hermana Andrea quien como hermana menor me ha apoyado y a toda mi familia y seres queridos que siempre confiaron en mí y jamás dudaron de mis capacidades.

Fernando J. Pérez

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme las fuerzas de seguir adelante y mantenerme siempre bajo su bendición y por estar presente en cada una de mis decisiones.

A la escuela politécnica del Ejército, a sus autoridades, profesores, maestros, compañeros por el apoyo y las herramientas para lograr mi formación.

A todos mis amigos que estuvieron a mi lado durante todo el tiempo como estudiante y supieron entregarme su amistad donde los recuerdos harán inolvidable el pasado en la Espe.

A la Carrera de Ingeniería Mecánica por entregarme todo el conocimiento para lograr servir al país como ingeniero mecánico.

Jorge P. Mejía

Cualquier logro requiere su gran esfuerzo y dedicación es por eso que agradezco principalmente a mis padres por encaminarme en el desafío de lograr ser un hombre de bien y un buen profesional, Agradezco a mi abuelita quien desde pequeño no hizo otra cosa más que apoyarme y querer todo mi bienestar.

Agradezco a los profesores de la ESPE quienes nos brindaron su apoyo y tiempo para lograr alcanzar la meta de este proyecto, agradezco a mi Director y Codirector quienes siempre supieron brindarnos una clara y beneficiosa orientación en nuestro proyecto de tesis

Agradezco en si a la mejor carrera del mundo Ingeniería Mecánica por brindarme por 5 años los conocimientos necesarios para amar mi profesión y lo que hago.

VIVA MECÁNICA!!!!

Fernando J. Pérez

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xx
NOMENCLATURA UTILIZADA.....	xxi
RESUMEN.....	xxiv

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	3
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.5. ALCANCE DEL PROYECTO.....	4

1.6.	JUSTIFICACIÓN.....	4
1.7.	META DEL PROYECTO.....	5
CAPÍTULO 2		
	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.1.1	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	7
2.1.2	DEFINICIONES GENERALES.....	7
2.1.3	INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	22
2.1.4	IMPORTANCIA DE LOS I. C.....	57
2.1.5	IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE ACEITES EN EL I.C.....	65
2.2	SISTEMAS ANEXOS.....	68
2.2.1	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	68
2.2.2	SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	72
2.2.3	SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO.....	74
2.2.4	INSTRUMENTACIÓN.....	75
2.2.5	ACEITE API.....	81
2.3	INGENIERÍA CONCEPTUAL.....	86
2.3.1	NORMATIVA Y REGULACIONES.....	86
2.3.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INSTALACIÓN.....	93
2.3.3	EQUIPOS PRELIMINARES.....	93

2.4	MÉTODO COMPUTACIONAL MEDIANTE ANSYS.....	102
2.4.1	INTRODUCCIÓN.....	102
2.4.2	CFX.....	102
CAPÍTULO 3		
	INGENIERÍA BÁSICA.....	109
3.1	INGENIERÍA BÁSICA MECÁNICA.....	109
3.1.1	CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DEL BANCO.....	109
3.1.2	DISEÑO DE RED DE FLUJO DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO.....	113
3.2	INGENIERÍA BÁSICA TÉRMICA.....	114
3.2.1	DISEÑO, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL I.C. TUBO CORAZA.....	114
3.2.2	DISEÑO, ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO....	136
3.3	DETERMINACIÓN DE INSTRUMENTOS.....	137
3.4	SIMULACIÓN DE LOS I.C. POR MÉTODO COMPUTACIONAL USANDO ANSYS.....	140
3.4.1	DETALLE DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS I.C.....	140
3.4.2	TOMA DE DATOS ANSYS.....	152
3.4.2	TABULACIÓN DE RESULTADOS ANSYS.....	152
CAPÍTULO 4		
	INGENIERÍA DE DETALLE.....	155
4.1	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO.....	155

4.2	INSTALACIONES ELÉCTRICAS E INSTRUMENTACIÓN.....	156
4.3	LISTADO DE INSTRUMENTOS Y MATERIALES.....	159
4.4	PLANOS DE LA ESTRUCTURA	161
4.5	PLANOS DEL PANEL.....	161
4.6	PLANOS DE LOS I.C.....	161
4.7	PLANOS DE LA RED DE FLUJO DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO.....	161
4.7	PLANOS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	161

CAPÍTULO 5

	CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	163
5.1	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE BANCO.....	163
5.2	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LOS I.C.	166
5.3	PROCESO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO.....	168
5.4	PROCESO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.....	170
5.5	PROCESO DE INSTALACIÓN DE LAS TUBERÍAS.....	173
5.6	PROCESO DE MONTAJE DE LA INSTRUMENTACIÓN.....	175

CAPÍTULO 6

	PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL QUIPO.....	177
6.1	RESULTADOS.....	177
6.2	VALIDACIÓN DE RESULTADOS	180

6.3	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS I.C.....	186
6.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	187
6.5	ELABORACIÓN DE LAS GUÍAS PRÁCTICAS.....	197
6.6	MANUAL DE OPERACIÓN.....	197
 CAPÍTULO 7		
	ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO.....	199
7.1	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	199
7.1.1	COSTOS DIRECTOS.....	199
7.1.2	COSTOS INDIRECTOS.....	203
7.1.3	GASTOS TOTALES.....	204
7.2	ANÁLISIS FINANCIERO.....	205
 CAPÍTULO 8		
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	207
8.1	CONCLUSIONES.....	207
8.2	RECOMENDACIONES.....	208
8.3	BIBLIOGRAFÍA.....	210
	ANEXOS.....	215

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°	CONTENIDO	PAG
Figura 2.1	Transferencia de calor a través de una pared plana, distribución de temperatura.....	9
Figura 2.2	Circuito térmico equivalente.....	10
Figura 2.3	Circuito térmico equivalente para una pared compuesta en Serie.....	11
Figura 2.4	Circuitos térmicos equivalentes para una pared compuesta en serie-paralelo.....	12
Figura 2.5	Circuitos térmicos equivalentes donde las superficies normales a la dirección x son isotérmicas.....	12
Figura 2.6	Circuitos térmicos equivalentes donde las superficies paralelas a la dirección x son adiabáticas.....	13
Figura 2.7	Cilindro hueco con condiciones convectivas en la superficie...	14
Figura 2.8	Distribución de temperaturas para una pared cilíndrica compuesta.....	15
Figura 2.9	Desarrollo de la capa límite de velocidad o hidrodinámica sobre una placa plana.....	18
Figura 2.10	Partes de un intercambiador de calor de tubo y coraza.....	23
Figura 2.11	Tubos con y sin aletas en intercambiadores de calor.....	24
Figura 2.12	Tipos de arreglos en los intercambiadores de calor.....	25
Figura 2.13	Porta tubos de un intercambiador de calor.....	26
Figura 2.14	Espaciador de deflector aumentado.....	26
Figura 2.15	Detalle de deflector aumentado.....	27
Figura 2.16	Deflector de disco y corona.....	27
Figura 2.17	Intercambiadores de calor de tubo concéntrico.....	29

Figura 2.18 Esquema completo de un Intercambiador de calor tubo y coraza.....	30
Figura 2.19 Esquema de un intercambiador de calor, dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos.....	30
Figura 2.20 Esquema de un intercambiador de calor, un paso por la coraza y dos pasos por los tubos.....	31
Figura 2.21 Intercambiadores de calor de flujo cruzado.....	31
Figura 2.22 Cubiertas de intercambiadores de calor compactos.....	32
Figura 2.23 Analogía térmica de un intercambiador de calor de tubo doble.....	36
Figura 2.24 Distribución de temperatura para un intercambiador de flujo paralelo.....	39
Figura 2.25 Distribución de temperaturas para un intercambiador de calor en contraflujo.....	42
Figura 2.26 Condiciones especiales de intercambiadores de calor.....	43
Figura 2.27 Factor de corrección para un intercambiador de calor de coraza y tubo con una coraza y cualquier múltiplo de dos pasos de tubo.....	45
Figura 2.28 Factor de corrección para un intercambiador de calor de coraza y tubo con una coraza y cualquier múltiplo de cuatro pasos de tubo.....	45
Figura 2.29 Relaciones de eficiencia de un intercambiador de calor.....	
Figura 2.30 Eficiencia de un intercambiador de calor de flujo paralelo y contraflujo.....	47
Figura 2.31 Eficiencia de un intercambiador de calor de coraza y tubos con una coraza y cualquier múltiplo de dos pasos por los tubos.....	48
Figura 2.32 Plano P-V-T en termodinámica.....	52
Figura 2.33 Gráficas donde se representan las diferentes regiones de estado.....	52

Figura 2.34 Propiedades de los diferentes tipos de aceite.....	53
Figura 2.35 Gráficas de viscosidad de diferentes tipos de aceite.....	53
Figura 2.36 Diagrama de Moody para pérdidas de presión.....	55
Figura 2.37 Intercambiador de calor de placas.....	58
Figura 2.38 Intercambiador compacto de placas soldadas.....	59
Figura 2.39 Intercambiador de calor de doble tubo.....	59
Figura 2.40 Intercambiadores de doble tubo industriales.....	60
Figura 2.41 Intercambiadores de calor de tubo y coraza.....	60
Figura 2.42 Intercambiador de casco y tubo de grafito.....	61
Figura 2.43 Mantenimiento a un intercambiador de calor.....	63
Figura 2.44 Mantenimiento a un intercambiador de calor multitubo.....	64
Figura 2.45 Impacto ambiental por el uso de materiales derivados del Petróleo.....	66
Figura 2.46 Partes de un sistema de refrigeración.....	70
Figura 2.47 Ciclo de refrigeración.....	71
Figura 2.48 Resistencias eléctricas para calentar el aceite.....	73
Figura 2.49 Esquema y partes de una bomba.....	74
Figura 2.50 Esquema y partes de un manómetro.....	77
Figura 2.51 Esquema de una Termocupla.....	78
Figura 2.52 Foto de termocuplas industriales.....	78
Figura 2.53 Fotografía de rotámetros utilizados en la industria.....	80

Figura 2.54 Nomenclatura de un aceite API.....	82
Figura 2.55 Rangos de temperatura de los aceites.....	85
Figura 2.56 Intercambiador de calor según las Normas Tema.....	91
Figura 2.57 Intercambiador de calor de placas tubulares fijas.....	91
Figura 2.58 Intercambiador de calor de placas tubulares y tubos U.....	92
Figura 2.59 Intercambiador de calor de placa tubular flotante.....	92
Figura 2.60 Intercambiador de calor de tubo y coraza concéntrico (Agua-Aceite).....	94
Figura 2.61 Intercambiador de calor de tubo y coraza multitubo (Agua-Aceite).....	94
Figura 2.62 Tanque de almacenamiento de aceite.....	95
Figura 2.63 Resistencia eléctrica utilizada para calentar el aceite.....	95
Figura 2.64 Bomba utilizada para transportar el aceite.....	96
Figura 2.65 Unidad de refrigeración.....	96
Figura 2.66 Evaporador y tanque de almacenamiento de agua.....	97
Figura 2.67 Bomba para distribuir agua.....	97
Figura 2.68 Control digital de temperatura para agua.....	98
Figura 2.69 Control digital de temperatura para aceite.....	99
Figura 2.70 Contactores.....	100
Figura 2.71 Caja de breaker.....	101
Figura 3.1 Gráfica de la estructura dibujada en SAP2000.....	110
Figura 3.2 Gráfica de la estructura extruida en el programa SAP 2000...	110

Figura 3.3 Asignación de cargas a la estructura.....	111
Figura 3.4 Gráfica de resultados de la estructura después de haber calculado todas las cargas.....	112
Figura 3.5 Estructura del banco de pruebas vista isométrica frontal.....	112
Figura 3.6 Estructura del banco de pruebas vista isométrica posterior....	113
Figura 3.7 Esquema básico del intercambiador de calor.....	113
Figura 3.8 Gráfica y esquema del I.C. concéntrico contraflujo.....	117
Figura 3.9 Analogía eléctrica.....	121
Figura 3.10 Gráfica y esquema del I.C. concéntrico flujo paralelo.....	123
Figura 3.11 Gráfica y esquema del I.C. multitubo contraflujo.....	126
Figura 3.12 Arreglo cuadrado en el I.C. multitubo.....	127
Figura 3.13 Gráfica y esquema del I.C. multitubo flujo paralelo.....	131
Figura 3.14 Arreglo cuadrado en el I.C. multitubo.....	131
Figura 3.15 Partes de un caudalímetro.....	137
Figura 3.16 Controles digitales de temperatura para el agua.....	138
Figura 3.17 Control digital de temperatura para el aceite.....	139
Figura 3.18 Opciones de proceso (ANSYS).....	141
Figura 3.19 Modelador de diseño (ANSYS).....	141
Figura 3.20 Resultado del modelado (ANSYS).....	142
Figura 3.21 Mallado (ANSYS).....	143
Figura 3.22 Condiciones de borde (ANSYS).....	144

Figura 3.23 Condiciones de borde Aceite y Agua (ANSYS).....	144
Figura 3.24 Ecuación gobernante de continuidad (ANSYS).....	145
Figura 3.25 Elementos de construcción volúmenes de control (ANSYS)..	145
Figura 3.26 Selección de fórmulas usadas por CFX (ANSYS).....	145
Figura 3.27 Configuración Solver (ANSYS).....	146
Figura 3.28 Comportamiento de transferencia de calor (ANSYS).....	146
Figura 3.29 Resultado gráfico temperatura Agua (ANSYS).....	147
Figura 3.30 Resultado gráfico de velocidad Agua (ANSYS).....	147
Figura 3.31 Cuerpo I.C. Multitubo (ANSYS).....	148
Figura 3.32 Mallado I.C. Multitubo (ANSYS).....	148
Figura 3.33 Condiciones de Entrada y Salida I.C. Multitubo (ANSYS).....	149
Figura 3.34 Condiciones de flujo Agua I.C. Multitubo (ANSYS).....	149
Figura 3.35 Condiciones de flujo Aceite I.C Multitubo (ANSYS).....	150
Figura 3.36 Opciones para Solver (ANSYS).....	150
Figura 3.37 Comportamiento de flujo Agua (ANSYS).....	151
Figura 3.38 Comportamiento del flujo Aceite (ANSYS).....	151
Figura 3.39 Selección de unidades (ANSYS).....	152
Figura 3.40 Esquema del I.C concéntrico.....	153
Figura 4.1 Partes del banco de pruebas (vista frontal).....	155
Figura 4.2 Partes del banco de pruebas vista posterior.....	156

Figura 4.3 Panel de control lado caliente (vista frontal).....	156
Figura 4.4 Panel de control lado caliente (vista posterior).....	157
Figura 4.5 Panel de control lado frío (vista frontal).....	157
Figura 4.6 Termómetro digital para toma de datos.....	158
Figura 5.1 Estructura preliminar del banco de pruebas.....	163
Figura 5.2 Estructura finalizada del banco de pruebas.....	164
Figura 5.3 Proceso de reconstrucción de los I.C.....	166
Figura 5.4 Toma de medidas de los I.C.....	166
Figura 5.5 Foto final del I.C multitubo.....	166
Figura 5.6 Tanque de almacenamiento de aceite, espuma aislante y resistencia eléctrica.....	168
Figura 5.7 Partes de la unidad de refrigeración.....	170
Figura 5.8 Bomba centrífuga y conexiones del sistema de refrigeración...	171
Figura 5.9 Instalación de tuberías en el sistema de refrigeración.....	173
Figura 5.10 Instalación de tuberías en el sistema de calentamiento.....	173
Figura 5.11 Panel de control de instrumentos para medición del banco de pruebas.....	175
Figura 6.1 Intercambiador de calor.....	190
Figura 6.2 Sistema de refrigeración.....	191
Figura 6.3 Capacidad del sistema de refrigeración.....	192
Figura 6.4 Resistencia eléctrica.....	193
Figura 6.5 Esquema del calentador.....	193

Figura 6.6 Bomba centrífuga.....	194
Figura 6.7 Breaker y contador.....	195
Figura 6.8 Caudalímetro.....	195
Figura 6.9 Medidor de temperatura.....	196
Figura K.1 Banco de Pruebas.....	307
Figura K.2 Partes principales del Banco de Pruebas.....	307
Figura K.3 Partes posteriores del Banco de Pruebas.....	308
Figura K.4 Partes del panel izquierdo del Banco de Pruebas.....	309
Figura K.5 Partes eléctricas del Banco de Pruebas.....	309
Figura K.6 Partes del panel derecho del Banco de Pruebas.....	310
Figura K.7 Partes del panel derecho del Banco.....	311
Figura K.8 Indicador de encendido del sistema.....	313
Figura K.9 Encendido del sistema de calentamiento.....	314
Figura K.10 Encendido del sistema de refrigeración.....	314
Figura K.11 Encendido de las Bombas.....	315
Figura K.12 Partes del caudalímetro.....	319

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°	CONTENIDO	PAG
Tabla 2.1	Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.....	17
Tabla 2.2	Rangos típicos de los números de Prandtl para fluidos comunes.....	20
Tabla 2.3	Factores de impureza representativos.....	34
Tabla 2.4	Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor.....	35
Tabla 2.5	Clasificación de los aceites según su grado SAE.....	82
Tabla 2.6	Especificaciones técnicas del control digital (TC-900Ri Power).	99
Tabla 2.7	Especificaciones técnicas del control digital MT-516CVT.....	100
Tabla 3.1	Pesos y elementos que contiene el banco de pruebas.....	109
Tabla 3.2	Pesos del agua y del aceite.....	111
Tabla 3.3	Especificaciones técnicas de los rotámetros.....	135
Tabla 3.4	Especificaciones técnicas del control digital TC-900RI.....	135
Tabla 3.5	Especificaciones técnicas del control digital MT-516CVT.....	135
Tabla 3.6	Tabla de resultado promedio de temperaturas.....	136
Tabla 3.7	Tabla de resultados finales.....	136
Tabla 3.8	Especificaciones técnicas de los rotámetros.....	138
Tabla 3.9	Especificaciones técnicas del control digital TC-900RI.....	139
Tabla 3.10	Especificaciones técnicas del control digital MT-516CVT.....	140

Tabla 3.11 Tabla de resultados promedio de temperaturas.....	152
Tabla 3.12 Tabla de resultados finales.....	153
Tabla 4.1 Funcionamiento de las termocuplas en el sistema.....	158
Tabla 4.2 Listado de equipos utilizados en los I.C.....	159
Tabla 4.3 Listado de equipos utilizados en el sistema de refrigeración....	159
Tabla 4.4 Listado de equipos utilizados en el sistema de calentamiento...	159
Tabla 4.5 Listado de equipos utilizados para la instrumentación.....	160
Tabla 4.6 Listado de materiales y accesorios utilizados en el Banco.....	160
Tabla 6.1 Resultados de la práctica intercambiador concéntrico flujo paralelo.....	178
Tabla 6.2 Resultados de la práctica intercambiador concéntrico contraflujo.....	178
Tabla 6.3 Resultados de la práctica intercambiador multitubo flujo paralelo.....	179
Tabla 6.4 Resultados de la práctica intercambiador multitubo contraflujo.	179
Tabla 6.5 Tabulación de todos los parámetros y resultados del intercambiador de calor tubo coraza concéntrico en flujo paralelo.....	181
Tabla 6.6 Tabulación de todos los parámetros y resultados del intercambiador de calor tubo coraza concéntrico en contraflujo.....	182
Tabla 6.7 Tabulación de todos los parámetros y resultados del intercambiador de calor tubo coraza multitubo en flujo paralelo.....	184
Tabla 6.8 Tabulación de todos los parámetros y resultados del intercambiador de calor tubo coraza multitubo en contraflujo...	185
Tabla 6.9 Condiciones generales para el análisis de resultados del I.C...	188

Tabla 6.10 Tabulación de resultados mediante los métodos de cálculos..	188
Tabla 7.1 Costos de materiales base.....	199
Tabla 7.2 Costos de materiales eléctricos.....	200
Tabla 7.3 Costos de materiales refrigeración.....	200
Tabla 7.4 Costos de instrumentación.....	201
Tabla 7.5 Costos de fluidos.....	201
Tabla 7.6 Costos de accesorios.....	201
Tabla 7.7 Costos varios.....	202
Tabla 7.8 Remuneración técnicos especializados.....	202
Tabla 7.9 Remuneración técnicos.....	202
Tabla 7.10 Honorarios Director y Codirector.....	203
Tabla 7.11 Misceláneos.....	203
Tabla 7.12 Gastos totales.....	204
Tabla 7.13 Aporte económico del proyecto.....	205
Tabla K.1 Rangos de operación.....	312
Tabla K.2 Características técnicas del I.C. tubo concéntrico.....	312
Tabla K.3 Características técnicas del I.C. multitubo.....	313
Tabla K.4 Descripción y especificaciones de los caudalímetro.....	321

ÍNDICE DE ANEXOS

N°	CONTENIDO	PAG
	ANEXOS.....	215
	ANEXO A. Propiedades termo físicas del agua.....	217
	ANEXO B. Propiedades termo físicas del aceite de motor.....	221
	ANEXO C. Propiedades termo físicas de Hidrocarburos.....	225
	ANEXO D. Planos del conjunto del banco de pruebas.....	229
	ANEXO E. Planos de la estructura del banco de pruebas.....	233
	ANEXO F. Planos del panel del banco de pruebas.....	239
	ANEXO G. Planos de los intercambiadores de calor del banco de Pruebas.....	245
	ANEXO H. Planos de la red de flujo de los fluidos de trabajo.....	259
	ANEXO I. Planos del sistema de calentamiento.....	269
	ANEXO J. Guías de prácticas del laboratorio.....	277
	ANEXO K. Manual de Usuario.....	301
	ANEXO L. Hoja de cálculo Math Cad para las iteraciones.....	325

NOMENCLATURA

q''_x	=	calor o transferencia de calor por unidad de área
k	=	conductividad térmica
dt/dx	=	gradiente de temperatura
A	=	área de transferencia de calor
T_∞	=	temperatura del fluido
T_s	=	temperatura de superficie
T_c	=	temperatura del fluido frío
T_h	=	temperatura del fluido caliente
i	=	lado interno
o	=	lado externo
r_1	=	radio sin tomar en cuenta el espesor del tubo
r_2	=	radio tomando en cuenta el espesor del tubo
h	=	coeficiente de transferencia de calor por convección
Nu	=	número de Nusselt
Pr	=	número de Prandtl
μ	=	viscosidad dinámica
ν	=	viscosidad cinemática
Re	=	número de Reynolds
ε	=	emisividad

δ	=	constante de Stefan Boltzmann
U_o	=	coeficiente global de transferencia de calor
R_f	=	factor de impureza
R_w	=	resistencia de conducción
P	=	presión
V	=	volumen
ρ	=	densidad
m	=	masa
L_c	=	longitud característica
ΔT_m	=	diferencia de temperaturas media apropiada
K_{cu}	=	conductividad térmica del cobre
K_{ac}	=	conductividad térmica del acero
d_o	=	diámetro externo de los tubos
d_i	=	diámetro interno de los tubos
D_e	=	diámetro de la coraza
C_p	=	calor específico
T_{hi}	=	temperatura de entrada del fluido caliente
T_{ci}	=	temperatura de entrada del fluido frío
T_{ho}	=	temperatura de salida del fluido caliente
T_{co}	=	temperatura de salida del fluido frío

Mh	=	flujo másico del fluido caliente
Mc	=	flujo másico del fluido frío
Dh	=	diámetro hidráulico
f	=	factor de fricción
$DMLT$	=	diferencia media logarítmica de temperaturas
NUT	=	número de unidades de transferencia
Q	=	calor transmitido

RESUMEN

En la actualidad es necesario en el proceso de enseñanza – aprendizaje proporcionar al estudiante universitario equipos de tecnología adecuada que permitan realizar ensayos, pruebas y diseños experimentales científicos con las condiciones similares a las del trabajo en situaciones o escenarios reales. Los prototipos diseñados, construidos e implementados con este fin permiten a menor costo validar y consolidar conceptos, teorías y aplicaciones importantes.

En base a esto se ha tomado la iniciativa de aportar al laboratorio de conversión de la energía del DECEM, un banco de pruebas para intercambiadores de calor multitubo y tubo concéntrico en flujo paralelo y contraflujo como ya posee el laboratorio con la diferencia que este trabajará con fluidos Agua-Aceite al contrario del ya existente que trabaja solo con fluidos Agua-Agua.

Todo esto con el fin que el estudiante pueda acceder a realizar prácticas en el laboratorio utilizando intercambiadores que trabajen con agua y también con aceite ya que hoy en día muchos intercambiadores de calor industriales utilizan dicho fluido mencionado y es muy importante adquirir conocimientos del comportamiento del mismo.

El proyecto se ha dividido en tres principales etapas. Primero se ha optado por la reconstrucción y reingeniería de dos intercambiadores de calor aportados por el laboratorio del DECEM. La segunda etapa trato el estudio y diseño del banco de pruebas y por último se procedió a la construcción y montaje del mismo donde se desarrollaron pruebas y se obtuvieron resultados los cuales fueron tabulados y validados comparando así que cumplen con lo establecido en el diseño.

Es así, que la Escuela Politécnica del Ejercitó y sus estudiantes que son los directos beneficiarios contarán con un equipo totalmente nuevo y perfectamente funcional, que facilitará el aprendizaje y les brindará datos exactos y confiables.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El Banco de Pruebas es básicamente la interacción de componentes a utilizarlo como instrumento de aprendizaje para estudiantes del DECEM de la ESPE; será una ayuda para el laboratorio de Conversión de la Energía ya que actualmente solo se cuenta con intercambiadores de calor (I.C.) agua – agua, en este nuevo banco se complementará con prácticas de aceites API y agua donde el estudiante podrá identificar y familiarizarse con sus elementos tales como bomba de aceite, bomba de agua, intercambiadores de calor, sistema de refrigeración, sistema de calentamiento, medidores de caudal y temperatura además toda su instrumentación requerida, también permitirá reconocer los procesos de refrigeración y calentadores por resistencias, identificando sus propiedades termodinámicas de una manera práctica.

Los intercambiadores de calor realizan la transferencia de energía térmica por medio de dos fluidos sean estos líquidos o gaseosos los cuales se encuentran separados por diferentes materiales sin mezclarse; a lo largo de la historia los intercambiadores han ido cambiando sus diseños para satisfacer las necesidades de la sociedad entre los sistemas térmicos y mecánicos, donde su uso más común es el radiador de los vehículos, en el cual el agua es enfriada por medio de aire proporcionado por un ventilador que pasa por el radiador para enfriar el agua que fue calentada por la combustión del motor y la fricción de las partes. También en sistemas de refrigeración, calderas, hornos, refinerías entre otros.

Dentro de la ingeniería mecánica, una de las ramas más importantes es la de los hidrocarburos, siendo indispensable el estudio y conocimiento de los diferentes tipos de intercambiadores de calor para los procesos de extracción, destilación y refinado del petróleo.

1.2 ANTECEDENTES

Durante el transcurso de la carrera, los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica al cursar varias asignaturas han observado los métodos de aprendizaje así como los instrumentos pedagógicos e infraestructura de una manera analítica, actualmente se ha logrado comprender que en la ingeniería, los laboratorios forman una parte muy importante en este campo ya que mediante este tipo de aprendizaje práctico mejora el entendimiento y rendimiento de los estudiantes incrementando su nivel de aprendizaje, lo cual redundará en el desarrollo del ejercicio profesional.

Las materias y asignaturas donde la energía es esencial y sus cálculos tiene un bajo porcentaje de error, se lo puede demostrar realizando prácticas de diferentes temas de acuerdo al campo requerido, donde en el laboratorio de Conversión de la Energía del DECEM tiene la mayoría de instrumentos y bancos de pruebas para realizar las prácticas pero no está por demás señalar que un nuevo banco de pruebas podría ser muy útil para complementar el aprendizaje con más variedad de guías prácticas. El laboratorio de Conversión de la Energía del DECEM tiene un banco de prueba de intercambiadores de calor de tipo tubo y coraza y otro multitubos (5 tubos), donde sus calo portadores son agua – agua, siendo este el único fluido en estudio, por lo cual se ha generado un estudio previo para incorporar un nuevo Banco de Pruebas de este tipo pero con instrumentación local e intercambiadores de calor diseñados para el efecto con la diferencia de que este usará como fluido motriz aceites API y agua los cuales compartirán la transferencia de calor por medio de la convección producida por el contacto de estos dos fluidos separados por el o los tubos dependiendo del intercambiador.

Además contará con nuevas prácticas las cuales permitirán el cambio de calo portadores, su cantidad y dirección de caudal para las diferentes mediciones.

Para el desarrollo de este proyecto el laboratorio de Conversión de la Energía aportará con un sistema de refrigeración y un I.C. multitubo los cuales fueron probados y analizados para ser utilizados en este nuevo banco de pruebas.

1.3 IDENTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el laboratorio de la conversión de la energía del DECEM se tiene actualmente un banco de pruebas de intercambiadores de calor los cuales utilizan como fluido de trabajo agua, donde los estudiantes pueden observar el comportamiento de la transferencia de calor entre la diferencia temperatura del mismo fluido, donde se hace indispensable el desarrollo de un Banco de Pruebas que pueda dar opción a tener más que un fluido caloportador, para el estudio de diferentes elementos térmicos como es el caso de los aceites de diferentes grados API (American Petroleum Institute), es aquí donde se define al problema como el hecho de tener este Banco de Pruebas para que los estudiantes del DECEM y otras universidades puedan mejorar el estudio de los aceites y su comportamiento ya que este es muy importante dentro del ámbito laboral para el Ingeniero Mecánico en la Industria.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la ingeniería conceptual, básica y de detalle de un banco de pruebas de I.C. tubo coraza y concéntrico que utilice como fluidos de trabajo aceites API y agua para el laboratorio de conversión de la energía del DECEM

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Disponer de un banco de pruebas de intercambiadores de calor donde sus fluidos calo portadores serán aceites de diferentes grados API y agua.
- Investigar el comportamiento de diferentes tipos de aceites API en los I.C.
- Demostrar por medio de prácticas que los datos obtenidos corresponden a las formulas existentes para el diseño de intercambiadores de calor.
- Beneficiar a los estudiantes CIME con nuevas prácticas las cuales complementarán el estudio de transferencia de calor en los intercambiadores.
- Realizar el estudio económico, financiero y ambiental del banco de pruebas.

1.5 ALCANCE DEL PROYECTO

Se desea realizar la Ingeniería conceptual, básica y de detalle de un banco de pruebas para intercambiadores de calor tipo tubo concéntrico y multitubo para flujo paralelo y contraflujo utilizando como fluidos de trabajo aceites API y agua con el cual se podrá realizar prácticas para adquirir varios datos como las temperaturas de entrada y salida así como los flujos máscicos de cada fluido calo portador para tabularlos y posteriormente encontrar los valores de transferencia de calor para ser comparados con los cálculos analíticos, los cuales permitirán una mayor comprensión sobre el funcionamiento de los Intercambiadores de Calor.

A la finalización del proyecto, el estudiante del DECEM podrá realizar nuevas prácticas para conocer el intercambio de calor con otros tipos de fluidos como es el caso de los aceite con diferentes grados API para motores de combustión interna.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Es importante la ingeniería básica, conceptual y de detalle del banco de pruebas de intercambiadores de calor para:

- Complementar el aprendizaje y obtener mayores opciones así como expectativas de experimentación a los estudiantes del DECEM que actualmente cursan las asignaturas de Diseño Térmico y Transferencia de Calor.
- Investigar el comportamiento de varios aceites API en el proceso de transferencia de calor con el agua a través de I.C.
- Apoyar a la Escuela Politécnica del Ejercito (ESPE) y a la Carrera de Ingeniería Mecánica del DECEM con el desarrollo constante en los laboratorios y ahorro económico.

1.7 META DEL PROYECTO

El Banco de Pruebas de intercambiadores de calor acetites API y agua facilitará el estudio, aprendizaje y conocimiento de los intercambiadores de calor y sus fluidos de trabajo, habrán alrededor de cien estudiantes CIME por semestre que complementen las prácticas actualmente existentes en el laboratorio de conversión de la energía del DECEM en las materias de transferencia de calor y diseño térmico.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En la etapa de estudiantes nos centramos en el estudio de la termodinámica aprendiendo que la energía se trasfiere de un medio al otro, o con el exterior mediante muchas interacciones denominadas trabajo y calor. Es importante diferenciar la termodinámica de la transferencia de calor; ya que la termodinámica estudia los estados finales de los procesos termodinámicos y la transferencia de calor abarca todas las etapas de dichos procesos.

2.1.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

Para centrarnos en el estudio de la transferencia de calor es importante tener claro todos los conceptos necesarios para entender el significado de la transferencia de calor, los diferentes procesos que implican y comprender el por qué es importante el estudio de la misma.

Transferencia de calor (o calor) es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Siempre que exista una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, debe ocurrir una transferencia de calor.¹

2.1.2 DEFINICIONES GENERALES

El estudio de la transferencia de calor consta de tres procesos por los cuales el calor se va a transferir, estos son: conducción, convección y radiación.

¹INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999, p 2

2.1.2.1 Conducción

La conducción es la transferencia de calor entre cuerpos por la diferencia de temperaturas es decir cuando existe un gradiente de temperatura, en un medio estacionario, el proceso de conducción transporta la energía de las partículas energizadas con las menos energizadas que posee una sustancia producto de la alteración entre las mismas.

Existen muchos ejemplos de transferencia de calor por conducción, sencillamente cuando nosotros tomamos un elemento con nuestras manos, estamos transfiriendo el calor de nuestro cuerpo hacia el objeto que obviamente se va a encontrar a diferente temperatura que la nuestra. Gracias a los estudios realizados se puede cuantificar los procesos de transferencia de calor es decir se procede a calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo, en el caso de la conducción la ecuación se la conoce como ley de Fourier, el modelo o ecuación matemática se la expresa de la siguiente formula.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx}$$

Ec: 2.1

Donde q''_x (w/m^2) es la transferencia de calor por unidad de área es decir la velocidad en la que se va transmitir el calor por área, dT / dx es la diferencia de temperatura sobre la longitud que atraviesa el flujo de calor y por último la letra k es una propiedad termodinámica conocida como conductividad térmica que es la propiedad que tiene cada material para transmitir calor. Si reemplazamos el diferencial de temperatura tenemos que:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Ec: 2.2

Entonces la fórmula para la conducción quedaría expresada de la siguiente forma:

$$q''_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = -k \frac{\Delta T}{L}$$

Ec: 2.3

En un área específica la ecuación es la siguiente:

$$q_x = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} = -kA \frac{\Delta T}{L} \quad \text{Ec: 2.4}$$

Se puede manifestar que la conducción es la transferencia de calor por difusión de energía, es decir la transmisión de calor de un medio a otro por un gradiente de temperatura en el sistema, por medio de ley de Fourier y sus ecuaciones se puede cuantificar la cantidad de calor entregado o recibido en este proceso. La ley de Fourier menciona que el flujo de calor es normal a la superficie.

2.1.2.1.1 Conducción unidimensional de estado estable

Pared plana.

En la conducción unidimensional en una pared plana la temperatura está en función de la coordenada x , es decir que el calor se transfiere solo en esta dirección. Para el cálculo se debe tomar en cuenta las condiciones de la pared especialmente las condiciones de temperatura como se muestra a continuación en la figura:

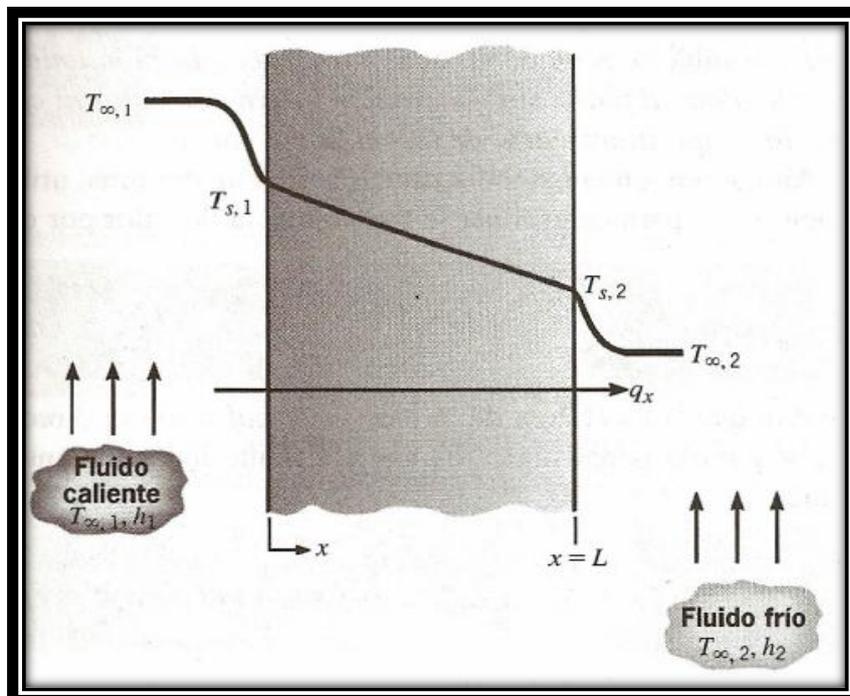


Figura 2.1 Transferencia de calor a través de una pared plana, distribución de temperatura.

Se puede observar que la transferencia de calor del fluido empieza desde la temperatura del fluido caliente $T_{\infty,1}$ hacia la pared $T_{s,1}$ por el proceso de convección, luego de eso por el proceso de conducción se transporta el calor desde $T_{s,1}$ a $T_{s,2}$ para que finalmente de nuevo a través del proceso de convección el calor sea transferido desde $T_{s,2}$ hacia el fluido frío $T_{\infty,1}$.

Para explicar mejor las formas en que se pueden representar estos procesos de intercambio de calor, se ha llegado a usar un sistema de analogía eléctrica que consiste en asimilar los procesos de transferencia de calor con los circuitos eléctricos. De tal manera, se expresa que la longitud, el coeficiente de conductividad y el área son una resistencia y la diferencia de temperaturas es un diferencial de potencial. Al usar esta analogía se puede utilizar la ley de Ohm obteniendo de la ecuación general de conducción que:

$$qx = -kA \frac{\Delta T}{L}$$

Ec: 2.5

Donde: $\Delta T = T_1 - T_2 =$ Potencial térmico y $k \cdot A / L =$ Resistencia térmica, tomando en cuenta estos parámetros se tiene que:

$$q = \frac{\Delta T}{R_t}$$

Ec: 2.6

En este caso para paredes planas la analogía eléctrica quedaría representada por el siguiente circuito térmico equivalente:

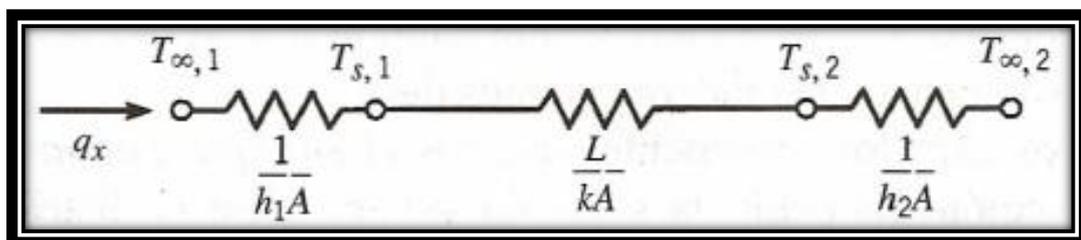


Figura 2.2 Circuito térmico equivalente

donde: $R_{t,cond} = \frac{1}{h_1 A}$ y $R_{t,conv} = \frac{L}{kA}$, se puede observar que la resistencia se encuentra en serie según la analogía de Ohm que la resistencia total es igual a:

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A}$$

Ec: 2.7

Finalmente la fórmula para calcular la transferencia de calor total del proceso en pared plana queda de la siguiente manera:

$$q = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{total}}$$

Ec: 2.8

Pared compuesta

Así mismo siguiendo las analogías establecidas anteriormente se usa el mismo procedimiento en sistemas un poco más complejos, donde haya resistencias en serie y en paralelo debido a paredes que contengan capas de diferente material como se muestra en el siguiente gráfico:

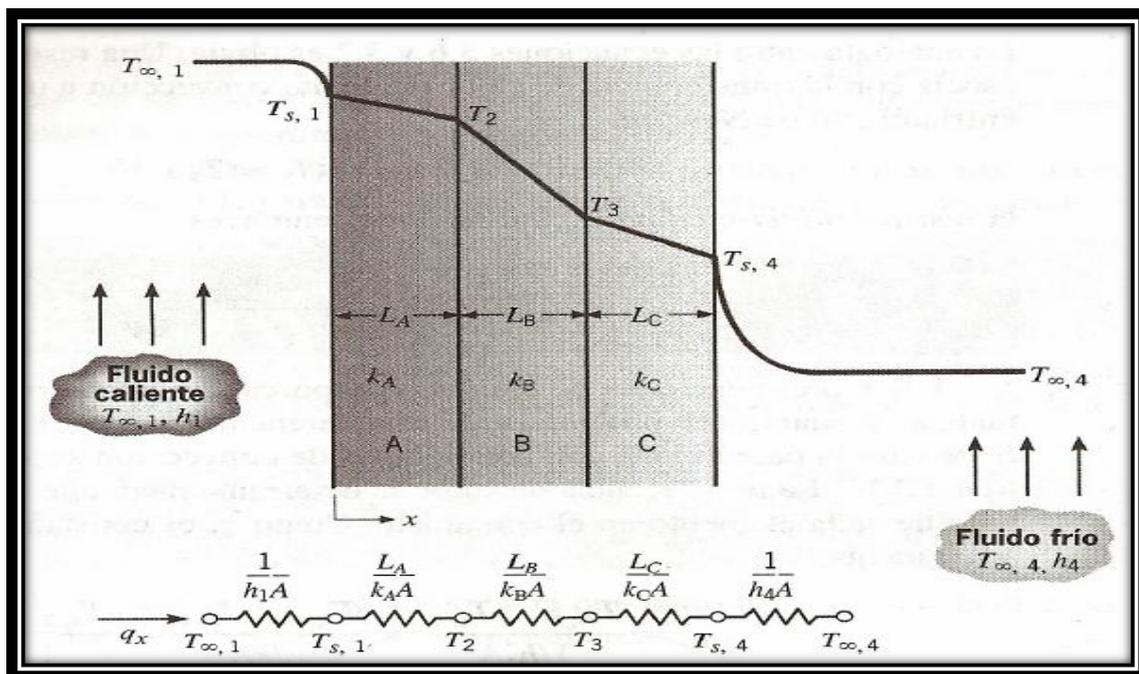


Figura 2.3 Circuito térmico equivalente para una pared compuesta en serie

En este caso se obtiene un circuito de resistencias térmicas en serie pero de paredes de diferentes materiales separados por la nomenclatura A B y C, nótese que los coeficientes de conductividad térmica cambian según el tipo de material pero igual es un sistema equivalente con la cual sumando todas las resistencia en

serie se puede obtener una resistencia total y a su vez se puede calcular el calor transferido.

En el caso que las paredes planas presenten un flujo de calor bidimensional las configuraciones se presentan en serie y en paralelo.

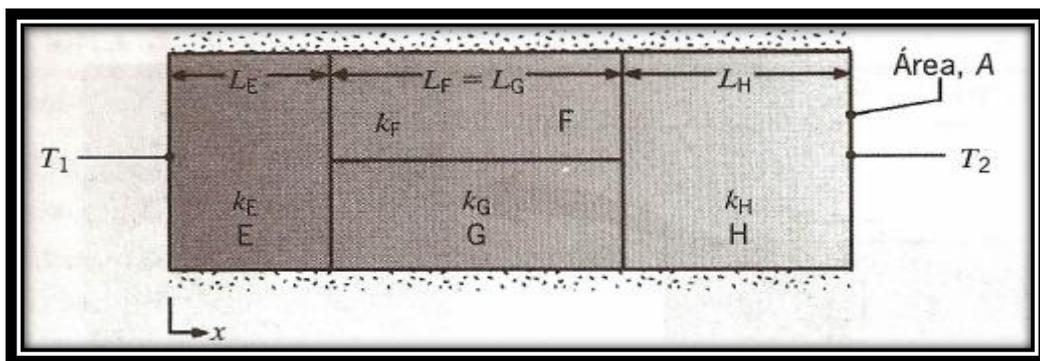


Figura 2.4 Circuitos térmicos equivalentes para una pared compuesta en serie-paralelo.

Suponiendo que se mantienen las condiciones unidimensionales la configuración se puede manifestar en dos circuitos diferentes:

a) Donde se supone que las superficies normales a la dirección x son isométricas.

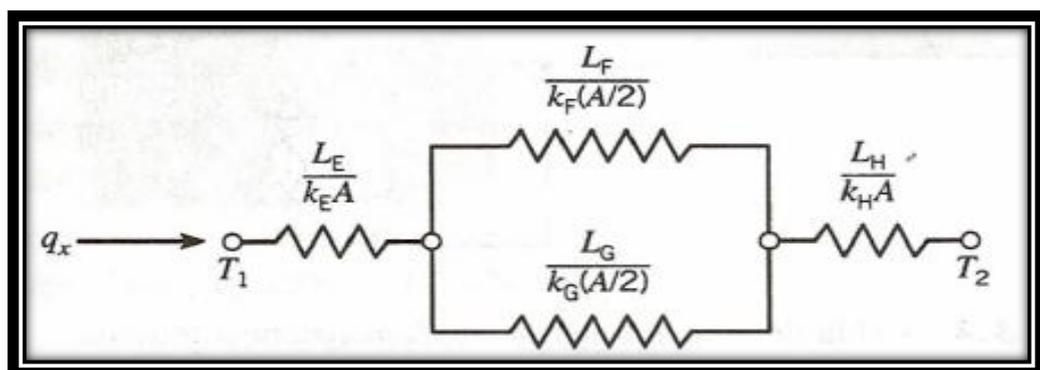


Figura 2.5 Circuitos térmicos equivalentes donde las superficies normales a la dirección x son isotérmicas.

b) Donde se supone que las superficies paralelas a la dirección x son adiabáticas.

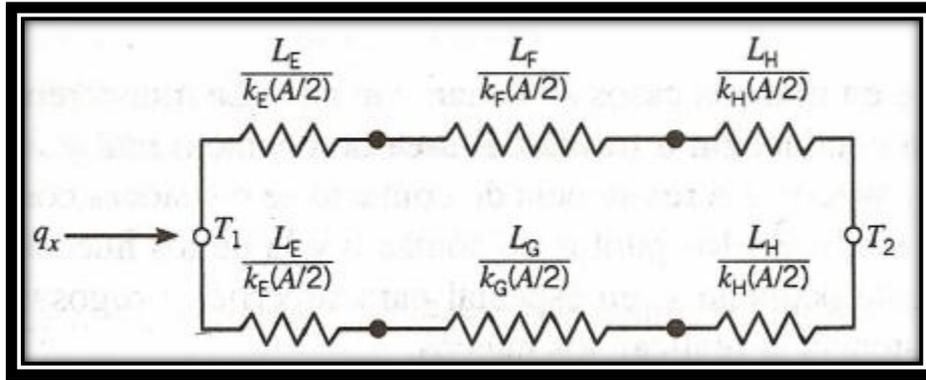


Figura 2.6 Circuitos térmicos equivalentes donde las superficies paralelas a la dirección x son adiabáticas.

En ambos casos se obtienen diferentes resultados en la resistencia total térmica y los valores obtenidos de q , relacionan la transferencia real de calor.

Sistemas radiales

En los sistemas radiales específicamente en la transferencia de calor a través de tubos o cilindros se presenta un gradiente de temperatura solo en la dirección radial y por lo tanto estos sistemas se tratan como unidimensionales. Estos sistemas bajo condiciones de estado estables y sin presencia de generación interna de calor se los analiza con el método estándar.

Un cilindro hueco en cuyas superficies transitan fluidos tanto internos como externos con diferentes temperaturas en condiciones de estado estables sin que se presente generación de calor la ecuación es:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0$$

Ec: 2.9

Donde k es una variable, el resultado de esta fórmula se vuelve evidente si se toma en cuenta la ley de Fourier. La rapidez en que la energía se conduce a través de cualquier superficie cilíndrica se expresa como:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr}$$

Ec: 2.10

A continuación se muestra el gráfico donde se puede observar el esquema del cilindro y su respectiva analogía térmica:

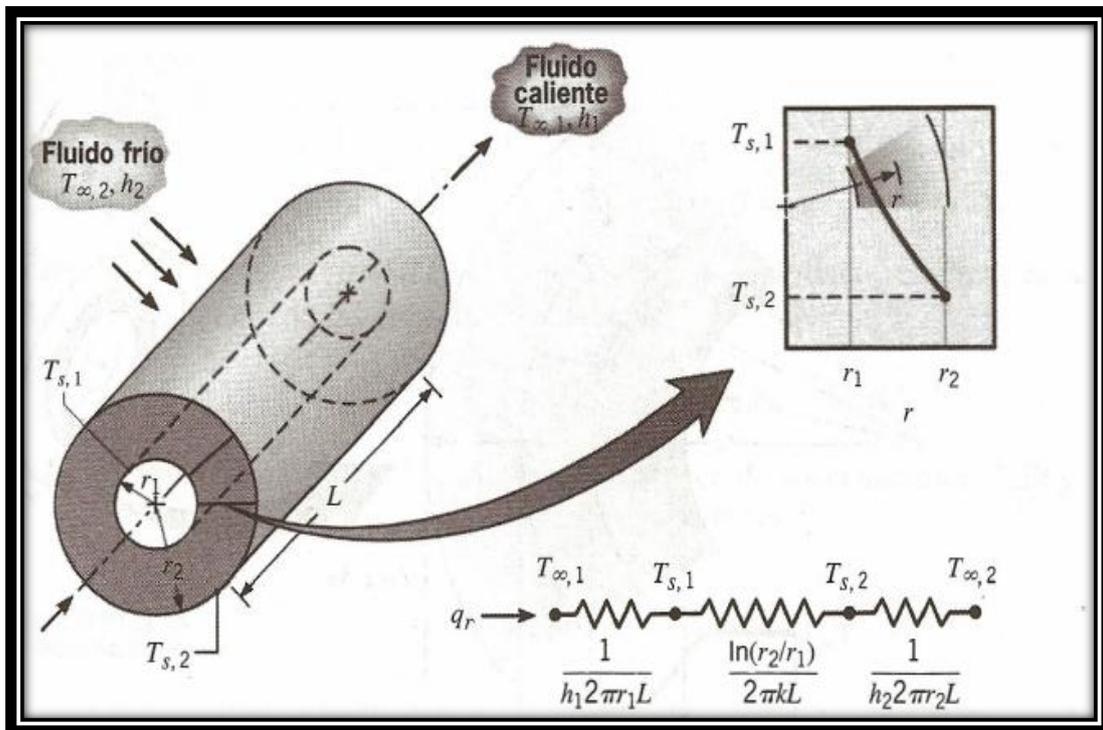


Figura 2.7 Cilindro hueco con condiciones convectivas en la superficie

Teniendo en cuenta las formulas presentadas y resolviendo las operaciones tanto diferenciales como integrales se obtiene una formula general para la conducción en superficies cilíndricas:

$$q_r = -2\pi Lk \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad \text{Ec: 2.11}$$

Y a su vez podemos determinar la fórmula de resistencia térmica por conducción que las superficies cilíndricas presentan:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad \text{Ec: 2.12}$$

En el caso de que el tubo presente varias paredes cilíndricas internas de mismo o diferente material, para el cálculo q general de transferencia de calor se suman las resistencias hasta obtener una resistencia total que a su vez es dividida para la

diferencia de temperaturas de entrada y de salida del fluido. A continuación se muestra en la figura el esquema del cilindro con varias paredes, su respectiva analogía eléctrica y su fórmula final:

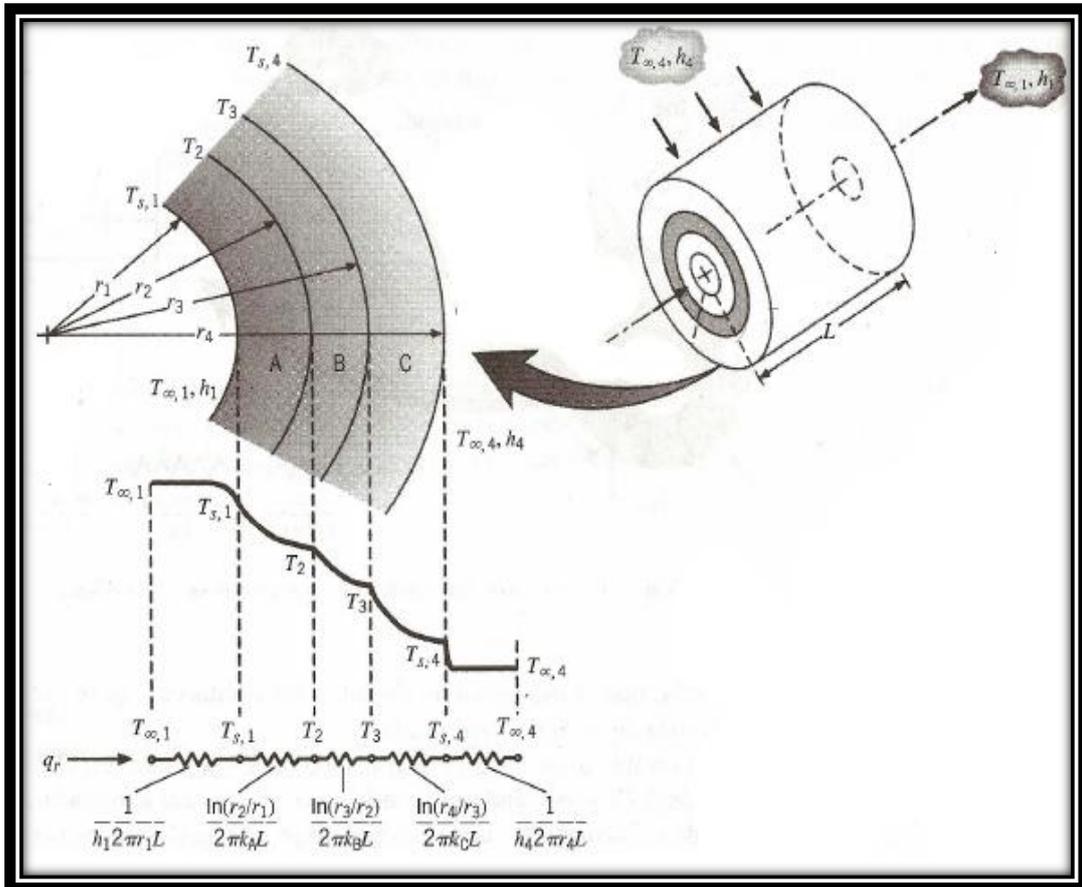


Figura 2.8 Distribución de temperaturas para una pared cilíndrica compuesta

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \frac{1}{h_4 2\pi r_4 L}}$$

Ec: 2.13

2.1.2.2 Convección

La convección se define como la transferencia de calor por un gradiente de temperatura entre un sólido o superficie y un fluido, que se mueve sobre dicho sólido o superficie, este fluido cuenta con un gran número de moléculas, que al moverse o alterarse en forma colectiva y en presencia de un gradiente de temperatura (con la superficie), transporta toda la energía almacenada en las partículas efectuándose así la transferencia de calor. La convección se clasifica en

libre y forzada. Al interés del estudio de este capítulo es comprender qué ocurre cuando se efectúa una transferencia de calor entre un fluido en movimiento y una superficie límite cuando estos están a distintas temperaturas, ya que este principio es el principio básico de los intercambiadores de calor.

Al conocer que el movimiento aleatorio entre las moléculas del fluido y del sólido o superficie aporta al proceso de transferencia de calor generalmente la aportación principal para dicha transferencia es netamente el movimiento general y total de las partículas del fluido. Como se manifestó anteriormente existen dos tipos de convección: la convección libre y la convección forzada. La convección libre o también llamada natural simplemente consiste en que el movimiento del fluido es causado naturalmente mientras que en la forzada el movimiento del fluido es obligado a fluir ya sea por una superficie mediante elementos como bombas o ventiladores. Se clasifica también la convección en externa e interna. Existe convección externa cuando el fluido fluye sobre una superficie e interna cuando el fluido fluye en el interior como por ejemplo en un tubo.

Como se observó en la parte de conducción, es posible lograr cuantificar la cantidad de calor transferido por este proceso de transferencia de calor, obteniendo así la fórmula general para convección:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad \boxed{\text{Ec: 2.14}}$$

Donde q'' es el flujo de calor por convección y está dado por (W/m^2), que es igual a la diferencia de las temperaturas entre la temperatura de la superficie con la del fluido y eso multiplicado por un coeficiente de transferencia de calor por convección llamado h dado por las unidades ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$); este coeficiente depende directamente de las condiciones de capa límite en las que influyen la forma o geometría de la superficie y algunas propiedades termodinámicas de los fluidos. Para la mayoría de casos h se determinó tabulado como se muestra a continuación:

Tabla 2.1 Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

PROCESO	h ($W/m^2 \cdot K$)
Convección libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50 - 20 000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2 500-100 000

Fuente: INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999, p 8.

Recordando que esta fórmula indica el flujo de calor, es decir la velocidad de calor transferido por unidad de área. Si se desea conocer la cantidad de calor transferido por convección por unidad de tiempo (q'') a través de una superficie plana la ecuación sería:

$$q = h \cdot A(T_s - T_\infty)$$

Ec: 2.15

donde: A es el área de la sección donde va a ser afectado el flujo de calor.

Es importante conocer bien que cuando el flujo de calor es positivo el calor está siendo transportado desde la superficie ($T_s > T_\infty$) y negativo si el calor está siendo transferido hacia la superficie ($T_s < T_\infty$).

2.1.2.2.1 Capa límite

Si se considera un flujo de un fluido sobre una superficie sólida que no sea porosa o mejor dicho que sea impermeable al fluido se puede observar que el fluido en movimiento tiende a detenerse por completo en la superficie y por tal razón toma una velocidad cero, es decir el fluido al tomar contacto con la superficie se adhiere debido a las fuerzas viscosas que se presentan al contacto con la superficie, a esto se denomina condición de no deslizamiento.

La capa que se adhiere a la superficie cumple la función de desacelerar la capa siguiente o adyacente de fluido debido a la viscosidad que presenta cada una de ellas, de manera que cada capa cumple la función de desacelerar a la siguiente y así sucesivamente, de esta manera se define la capa límite como la región de flujo que se encuentra junto o adyacente a la superficie donde los efectos de viscosidad y por lo tanto las variaciones de velocidad son considerables. Cuando la primera capa del fluido toca la superficie es decir la capa adyacente a la superficie esta tiene una velocidad relativa de cero con respecto a la superficie. A continuación se muestra una figura de cómo está relacionada las velocidades relativas de las capas del fluido.

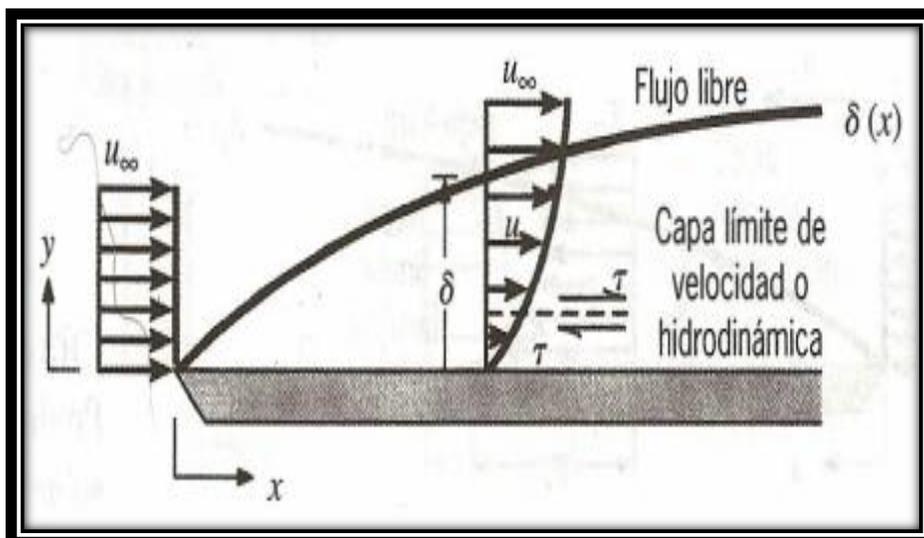


Figura 2.9 Desarrollo de la capa límite de velocidad o hidrodinámica sobre una placa plana.

2.1.2.2.2 Número de Nusselt

En honor al señor Wilhelm Nusselt quien realizó grandes aportaciones a la transferencia de calor por convección en la primera mitad del siglo XX se creó el Número de Nusselt con el objetivo de reducir las variables y dimensiones en las ecuaciones y reemplazarlas por números adimensionales, es así como al quitar las variables del coeficiente de transferencia de calor h el Número de Nusselt se define como:

$$Nu = \frac{hL_c}{K} \quad \boxed{\text{Ec: 2.16}}$$

donde: k es la conductividad térmica del fluido y L_c es la longitud característica.

Por lo tanto el número de Nusselt representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través la misma capa². Entre más grande sea el número de Nusselt mayor es la eficiencia del proceso de convección.

2.1.2.2.3 Flujo interno en comparación con el flujo externo.

Al clasificar el flujo de un fluido en interno y externo. El flujo interno es cuando obligamos a transportar el fluido entre superficies confinadas como por ejemplo en tubos, cañerías. En cambio flujo externo es cuando el fluido va a fluir sobre una superficie como por ejemplo placa, canal.

Por lo general en los intercambiadores de calor se muestran estos dos tipos de flujo ya que hay intercambiadores de calor que usan varios tubos internos donde se va a hacer llegar el fluido así como también habrán fluidos que fluyan por los exteriores de los tubos con la función principal de establecer el proceso de convección.

²YANUS A. ÇENGEL, Transferencia de calor y masa, Traducido del inglés por José Hernán Pérez, 3ra Edición, McGraw-Hill, México 2007, p358.

2.1.2.2.4 Número de Prandtl

El número de PRANDTL sirve para poder definir el espesor relativo entre la capa límite de velocidad y la térmica, en si es un numero adimensional que nos indica el cociente entre la difusividad de momento mejor conocido como viscosidad y la difusividad térmica. Podemos establecer la siguiente fórmula:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha}$$

Ec: 2.17

donde: ν es la viscosidad cinemática, α es la difusividad térmica, C_p es la capacidad calorífica a presión constante, μ es la viscosidad dinámica y k es la conductividad térmica.

A continuación se presenta la siguiente tabla donde se muestra el número Prandtl de algunos fluidos que ya están normalizados.

Tabla 2.2 Rangos típicos de los números de Prandtl para fluidos comunes

FLUIDO	Pr
Metales líquidos	0.004 – 0.030
Gases	0.7 – 1.0
Agua	1.7 – 13.7
Fluidos orgánicos ligeros	5 – 50
Aceites	50 – 100 000
Glicerina	2 000 – 100 000

Fuentes: YANUS A. ÇENGEL, Transferencia de calor y masa, Traducido del inglés por José Hernán Pérez, 3ra Edición, McGraw-Hill, México 2007, p365.

2.1.2.2.5 Flujo laminar y flujo turbulento

Se puede diferenciar el flujo laminar del turbulento simplemente fijándose en una columna de humo, cuando la columna de humo recién empieza a salir se observa que el flujo de humo posee líneas suaves bastante ordenadas y continuas hasta que después de cierta altura empieza a desordenarse viéndose en forma de fluctuaciones o con movimientos altamente alterados, al primer caso donde el flujo es continuo se lo conoce como flujo laminar mientras que cuando el flujo presenta alteraciones de forma y aumento de velocidad se lo conoce como flujo turbulento.

2.1.2.2.6 Número de Reynolds

Se conoce como número de Reynolds a la razón existente entre las fuerzas de inercia del fluido y las fuerzas viscosas del mismo. La transición de flujo laminar y flujo turbulento depende de varios factores tales como la velocidad del flujo, su temperatura, el tipo de fluido, la temperatura de superficie, la geometría de superficie, su temperatura y entre otros factores. Es por eso que Osborn Reynolds al haber realizado varios estudios significativos en el comportamiento de los fluidos determina la razón de fuerzas de inercias con las fuerzas viscosas estableciéndose así el número de Reynolds, un número que tiene unidades adimensionales y está dado por la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu}$$

Ec: 2.18

Donde V es la velocidad característica del fluido, L_c es la longitud característica de la configuración geométrica. Si el fluido se transporta mediante tubos L_c vendría a ser el diámetro D de la tubería y ν es la viscosidad cinemática del fluido ($\nu = \mu/\rho$).

2.1.2.3 Radiación

La radiación es el proceso de transferencia de calor entre dos cuerpos mediante ondas electromagnéticas, es decir la radiación se produce por cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos, la diferencia entre la radiación la

convección y la conducción es que la radiación se transporta por medio de ondas electromagnéticas mientras la conducción y convección necesitan de un medio material para la transferencia de calor.

Es así como cuantificando los métodos de transferencia de calor por radiación se tiene la siguiente fórmula:

$$q = \varepsilon \cdot \delta \cdot A (T_s^4 - T_\infty^4)$$

Ec: 2.19

Donde q es el flujo de calor por radiación, ε es una propiedad radiativa denominada emisividad que tiene valores en el rango de 0 a 1 y determina la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro.

El símbolo δ representa la constante de Stefan Boltzmann y está representada por el valor $\delta = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$. Las nomenclaturas T_s y T_∞ son las temperaturas de superficie y del fluido respectivamente, estas deben estar necesariamente en grados kelvin.

2.1.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor son equipos diseñados en la ingeniería para el intercambio de calor entre dos fluidos que poseen un gradiente de temperatura y se encuentran separados por una superficie sólida. Actualmente estos equipos son muy requeridos en muchas aéreas como por ejemplo en la de refrigeración para lo que es acondicionamiento de aire (Calefacción y Aire acondicionado), también son usados en la industria automotriz (Radiadores) y en diversas aplicaciones físico-químicas. La mayor cualidad de los intercambiadores de calor es que permiten la transferencia de calor entre los fluidos sin que ellos se mezclen.

Es importante recalcar que en el intercambiador de calor la transferencia de calor suele ser por convección en cada fluido y por conducción a través del medio superficial que los separa es por eso que para el análisis de los intercambiadores

de calor es conveniente trabajar con un coeficiente de transferencia de calor total “U” que toma en cuenta todos los procesos de transferencia.

2.1.3.1 Elementos y partes de un intercambiador de calor

Los elementos y partes de los intercambiadores de calor varían según el tipo de intercambiador de calor que se va a utilizar y la aplicación que se quiera efectuar, pero en sí, las partes generalmente son iguales y a continuación se darán a conocer.

Se toma como ejemplo el Intercambiador de Calor de tubo y coraza el cual es usado cuando se requieren superficies grandes de transferencia de calor. El intercambiador de calor cuenta con las siguientes partes: cabezal, tubos, placa de tubos, coraza, toberas y deflectores. A continuación se ilustra una figura donde se observa sus partes respectivamente.

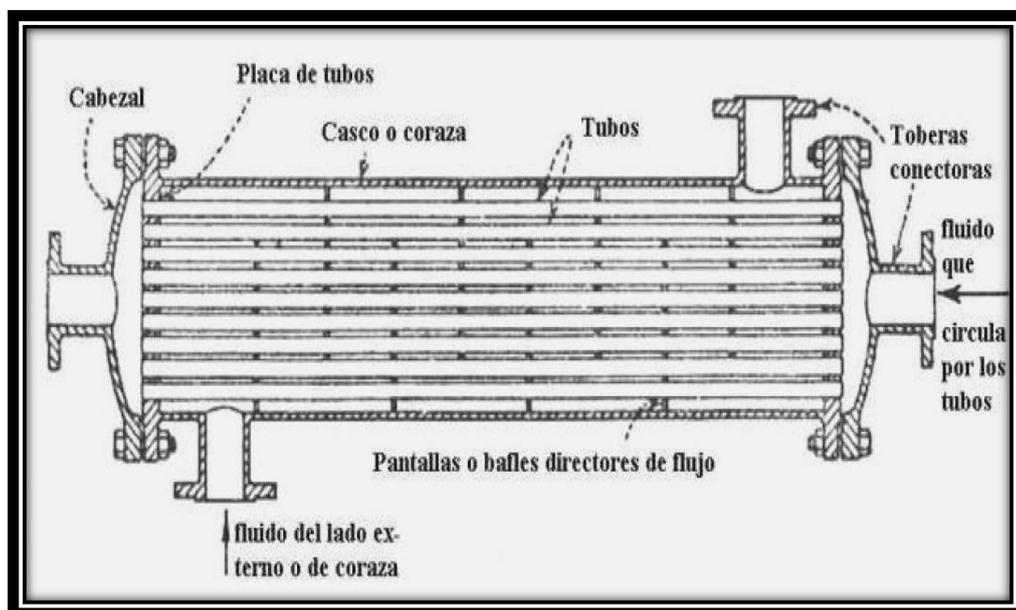


Figura 2.10 Partes de un intercambiador de calor de tubo y coraza

Tubos para intercambiadores de calor:

Los tubos para intercambiadores de calor son los elementos más básicos en el intercambiador de calor de tubo y coraza. Son los encargados de establecer la

superficie necesaria para no mezclar los fluidos que interactúan en la transferencia de calor, es decir separar los fluidos que fluyen dentro del tubo de los que fluyen por fuera de él. Estos tubos para intercambiadores se encuentran disponibles en varios metales, los que incluyen acero, cobre, admiralty, metal Muntz, latón, 70-30 cobre-níquel, aluminio-bronce, aluminio y aceros inoxidables³.

Los tubos de $\frac{3}{4}$ y 1 pulgada de diámetro son los más comunes para el diseño de un intercambiador de calor. Es común encontrarnos con tubos que poseen pequeñas aletas, estas son usadas para aumentar la superficie de transferencia de calor y se usa cuando el coeficiente de transferencia de calor del fluido en la coraza es mucho menor que el del fluido en el interior de los tubos, como se puede observar en la siguiente figura:

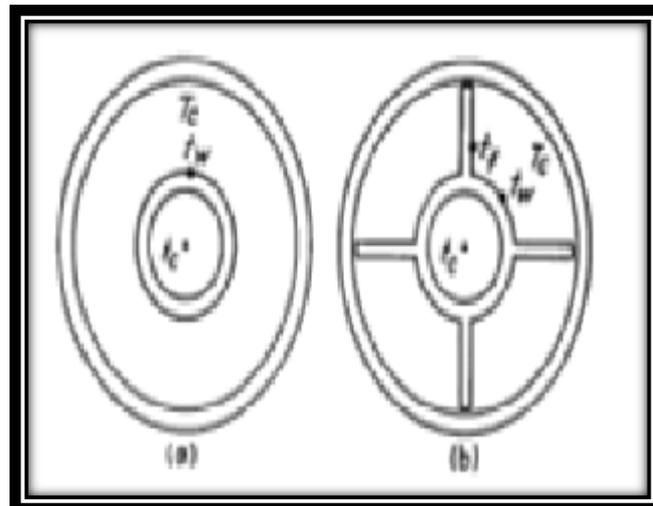


Figura 2.11 Tubos con y sin aletas en intercambiadores de calor

Cuando se refiere al espaciado en los tubos los orificios de los tubos no pueden taladrarse muy cerca uno del otro ya que un espacio o franja demasiado estrecha debilitaría el cabezal de tubos y espejos, para esto usamos los denominados arreglos ya sean triangulares o cuadrados como se muestra en la siguiente figura:

³DONALD Q. KERN, Procesos de transferencia de calor, Traducido del inglés por Nicolás Marino, 1era edición, Compañía Editorial Universal, México 1965, p160.

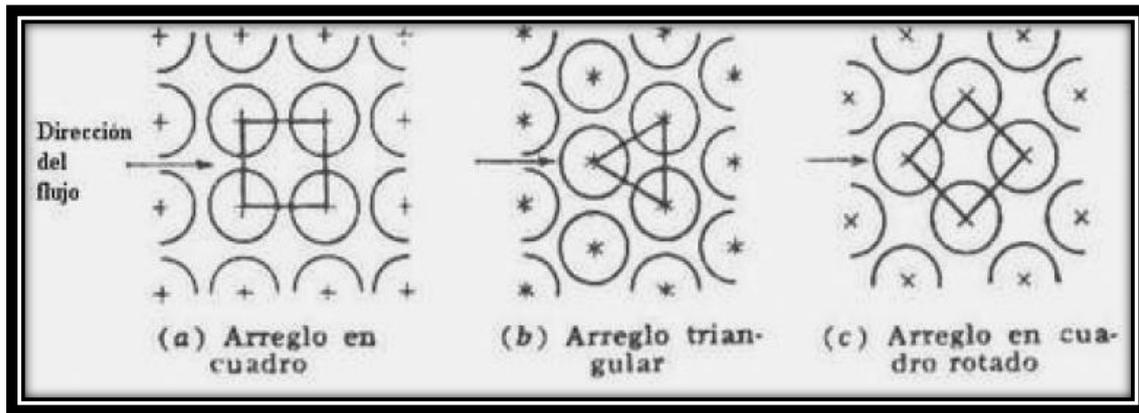


Figura 2.12 Tipos de arreglos en los intercambiadores de calor

Coraza:

Las corazas contienen la mayor cantidad del fluido y poseen por lo general unas boquillas que permiten el ingreso y salida del fluido.

Existen varios tipos de materiales utilizados para su fabricación como por ejemplo las corazas hasta de 12 pulgadas se fabrican de tubo de acero, cuando son mayores de 12 hasta 24 pulgadas el grosor es de 3/8 de pulgada ayudando a soportar presiones hasta de 300 lb/plg^2 , y por ultimo cuanto son mayores de 24 se fabrican rolando placas de acero.

Placa de tubos:

Placa de tubos o porta tubos: Son los encargados de soportar los tubos según sean los arreglos de los mismos. Para la fabricación de una placa de tubo es muy importante tomar en cuenta el material con el que se va a fabricar ya que este elemento está sometido a ataques corrosivos por ambos fluidos que actúan en la interferencia de calor. Los porta tubos deben ser fabricados de preferencia de material similar al de los tubos para evitar la corrosión galvánica y deben tener un espesor considerable de acuerdo a los tubos para poder soportar condiciones de operación como lo es la presión y la temperatura.



Figura 2.13 Porta tubos de un intercambiador de calor

Deflectores:

El uso principal de los deflectores en los intercambiadores de calor consiste en aumentar el proceso de transferencia de calor haciendo que el fluido se comporte como fluido turbulento. Esto se logra mediante hojas de metal perforadas establecidas a ciertas distancias dentro del intercambiador logrando mediante estas que el fluido fluya a través de la coraza a ángulos rectos con el eje de los tubos. A pesar que en la coraza fluya una cantidad pequeña de líquido causara una gran turbulencia y a la vez habrá una mayor transferencia de calor. Por lo general los deflectores poseen una altura equivalente al 75% del diámetro de la coraza. A continuación se puede ver en la figura diferentes tipos de deflectores:

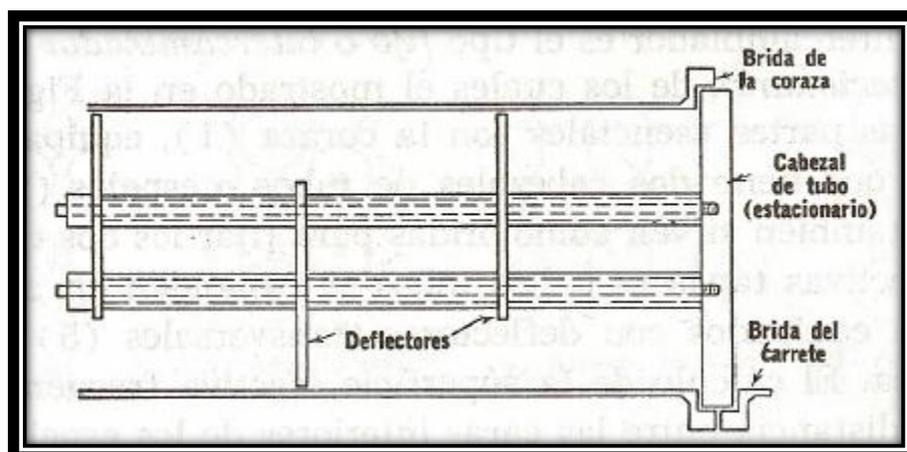


Figura 2.14 Espaciador de deflector aumentado

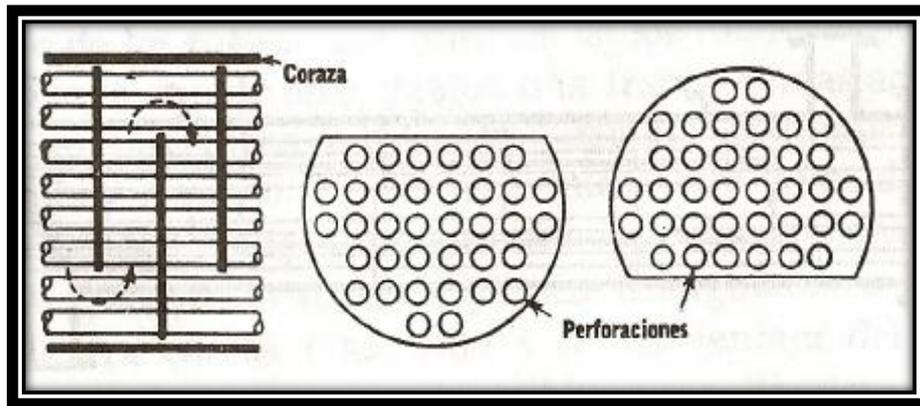


Figura 2.15 Detalle de deflector aumentado

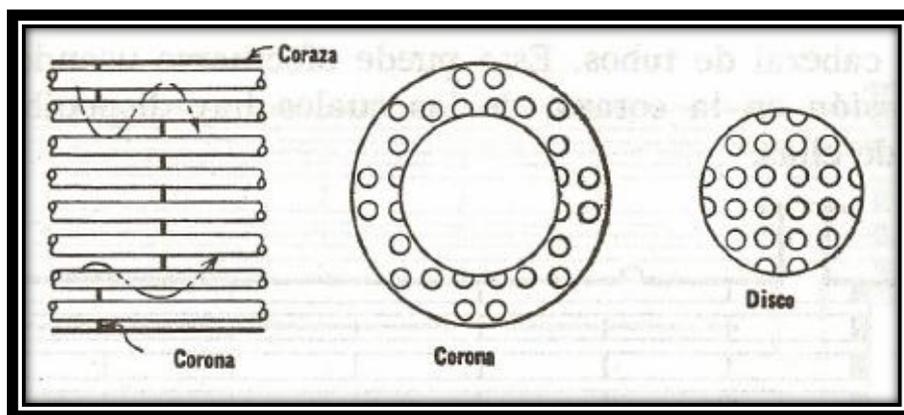


Figura 2.16 Deflector de disco y corona

2.1.3.2 Tipos de intercambiadores de calor

Existen varias formas de clasificar a los intercambiadores de calor, una de ellas es por sus componentes como por ejemplo:

- Tubos concéntricos
- Tubos y coraza
- De placas

Otra forma puede ser por el flujo:

- Flujo paralelo
- Flujo contracorriente
- Flujo cruzado

También se puede considerar por el número de pasos (1 – 1, 1 – 2, 2 – 4.)

2.1.3.2.1 Intercambiadores de calor de tubos concéntricos

El intercambiador de calor puede ser catalogado como el más simple de los intercambiadores de calor, donde los fluidos que van a interactuar se mueven en la misma dirección o en direcciones opuestas a través de una construcción de tubos concéntricos o comúnmente llamado doble tubo. Es ahí donde se puede clasificar los intercambiadores de calor dependiendo del sentido del flujo. Se conoce como flujo paralelo cuando los dos fluidos ingresan por el mismo extremo, fluyen a través del intercambiador en un mismo sentido y salen por el mismo extremo o vía de salida, caso contrario se conoce como flujo contracorriente cuando los fluidos ingresan por diferentes extremos, fluyen en el intercambiador en diferentes sentidos y salen por diferentes extremos.

En la industria, estos intercambiadores son usados para trabajar en situaciones donde se requiera transferencia de calor entre líquido-líquido como en industrias farmacéuticas, químicas y petroquímicas.

Entre una de las ventajas de este intercambiador de calor se tiene que el diseño presenta bastante facilidad al momento de su montaje y se puede ensamblar en cualquier sitio como por ejemplo un taller de plomería, y las superficies de transferencia de calor son de bajos costos.

Como desventaja presenta que este presenta una pequeña superficie de transferencia de calor dado la simplicidad de su diseño, no es aplicable para grandes procesos que se requiera una mayor transferencia de calor y su mantenimiento debe tener un mayor cuidado ya que existe el riesgo de fugas en sus elementos.

En la siguiente figura se presenta el esquema de un intercambiador de calor de tubo concéntrico en flujo paralelo y flujo contracorriente o contraflujo.

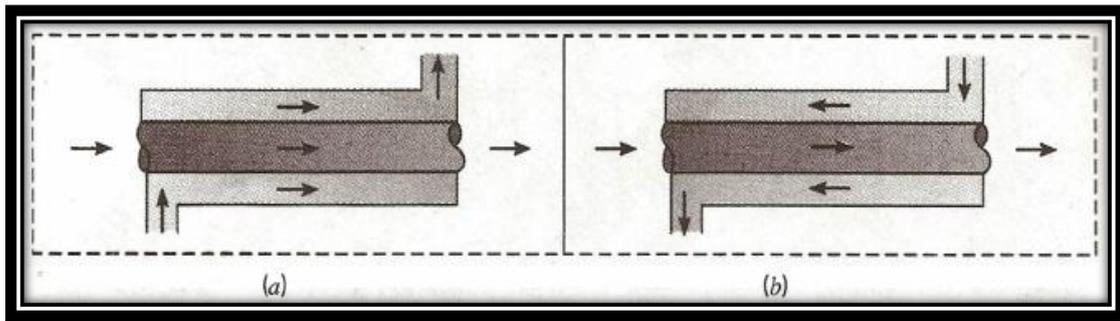


Figura 2.17 Intercambiadores de calor de tubos concéntricos. (a) Flujo paralelo. (b) Contraflujo.

2.1.3.2.2 Intercambiador de calor de tubo y coraza

Estos intercambiadores de calor quizá sean los más utilizados en aplicaciones industriales y contienen un gran número de tubos (a veces varios cientos) empacados en un casco con sus ejes paralelos a este. La transferencia de calor tiene lugar a medida que uno de los fluidos se mueve por dentro los tubos en tanto el otro se mueve por fuera de éstos, pasando por la coraza⁴.

Para una mejor transferencia de calor es común que los intercambiadores tenga desviadores, mejor conocidos como deflectores, con el objetivo de forzar el paso del fluido haciéndolo turbulento para una mayor transferencia de calor, los deflectores logran forzar al fluido para que este se mueva en dirección transversal a la coraza.

Debido al peso y al gran volumen que tienen estos equipos no son aplicables en la industria automotriz ni aeronáutica, pero si son requeridos en grandes maquinarias donde se requiera una gran transferencia de calor.

Los intercambiadores de calor de tubo y coraza se pueden clasificar así mismo como los intercambiadores concéntricos dependiendo del flujo, si es paralelo o contraflujo, pero también es común clasificarlos por el número de pasos.

⁴YANUS A. CENGEL, Transferencia de calor y masa, Traducido del inglés por José Hernán Pérez, 3ra Edición, McGraw-Hill, México 2007, p611.

El número de pasos está dado por el número de vueltas que del fluido por el mismo tubo; es decir si en un intercambiador de calor todos los tubos forman una U en la coraza se manifiesta que este intercambiador de calor es de paso 1-2, un paso por la coraza y dos por el tubo, así mismo cuando hay dos pasos por la coraza y cuatro por el tubo se dice que es un intercambiador de calor de paso 2-4, dos por la coraza y cuatro por los tubo.

A continuación se muestra una figura donde se podrá ver en detalle estos tipos de intercambiadores de calor.

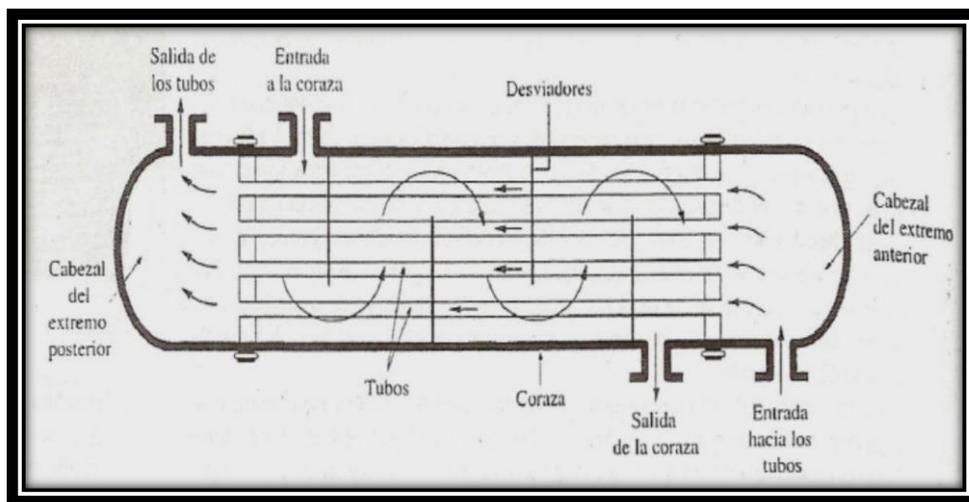


Figura 2.18 Esquema completo de un Intercambiador de calor tubo y coraza

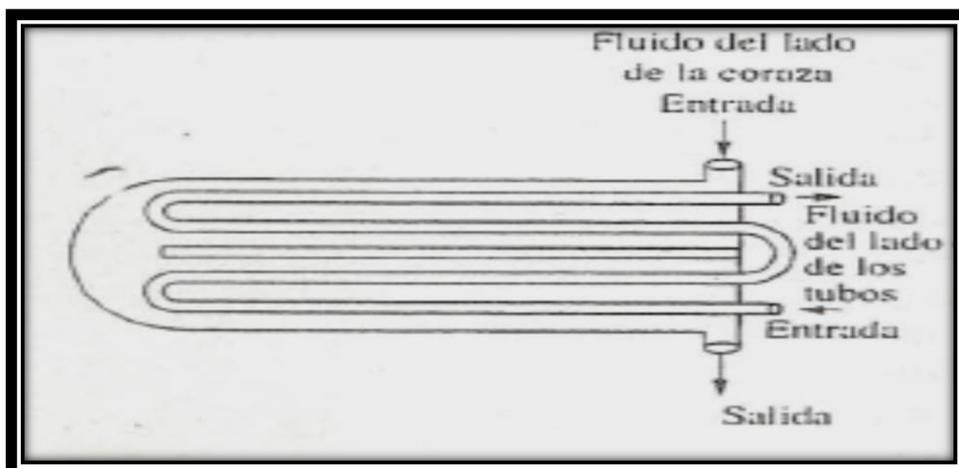


Figura 2.19 Esquema de un intercambiador de calor, dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos.

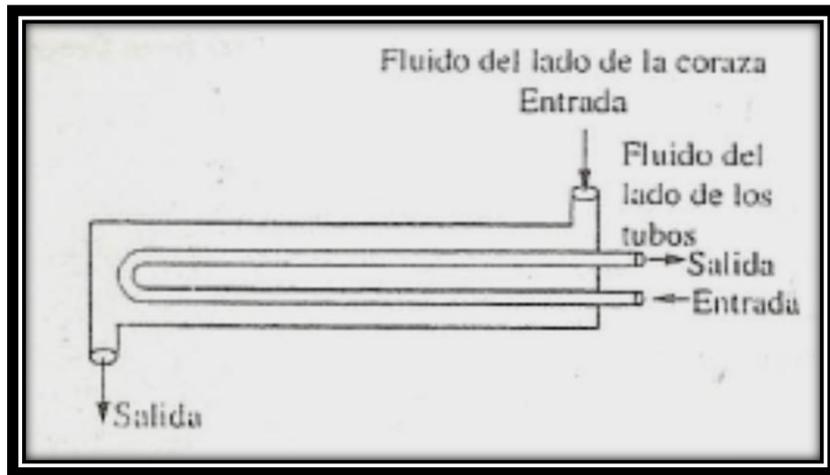


Figura 2.20 Esquema de un intercambiador de calor, un paso por la coraza y dos pasos por los tubos.

2.1.3.2.3 Intercambiador de calor de placas

Se usa generalmente cuando se desea conseguir una área superficial de transferencia de calor por unidad de volumen bastante grande y cuando al menos uno de los fluidos es un gas. Es importante comprender el comportamiento de este intercambiador de calor especialmente en la manera que se comportan los fluidos al momento de la transferencia de calor, es común confundirse o pensar que es lo mismo el contraflujo o flujo contracorriente que el flujo cruzado. El contraflujo es cuando los fluidos se mueven en diferentes direcciones pero en el mismo plano, en cambio tenemos flujo cruzado cuando los flujos se deslizan en diferentes planos específicamente perpendiculares entre sí.

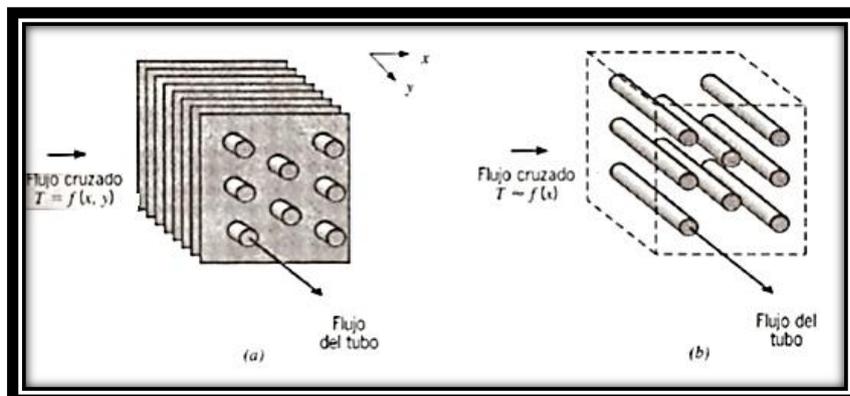


Figura 2.21 Intercambiadores de calor de flujo cruzado. (a) con aletas y ambos fluidos sin mezclar. (b) sin aletas con fluido mezclado y el otro sin mezclar.

En la figura se observa el comportamiento de los fluidos al momento de la transferencia de calor, se tiene dos tipos de intercambiadores: los sin aletas y con aletas como se muestra la figura (b), esto depende si el fluido está mezclado o no mezclado. Se dice que el fluido está mezclado cuando el intercambiador de calor no tiene aletas y el fluido puede moverse en dirección transversal libremente por los tubos, caso contrario es el intercambiador de calor con aletas de la figura (a) donde el fluido no puede moverse en dirección transversal ya que las aletas impiden dichos movimientos. La naturaleza de la condición de mezcla puede influir de manera significativa en el funcionamiento del intercambiador de calor⁵.

Existen muchos intercambiadores de este tipo, como ya se ha mencionado especialmente cuando se requiere una mayor área de transferencia de calor por unidad de volumen ($\geq 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Existen muchas configuraciones tanto como en tubos y en aletas, unos pueden ser redondos o cuadrados así mismo las aletas pueden ser de placas o circular como se ilustra en la siguiente figura.

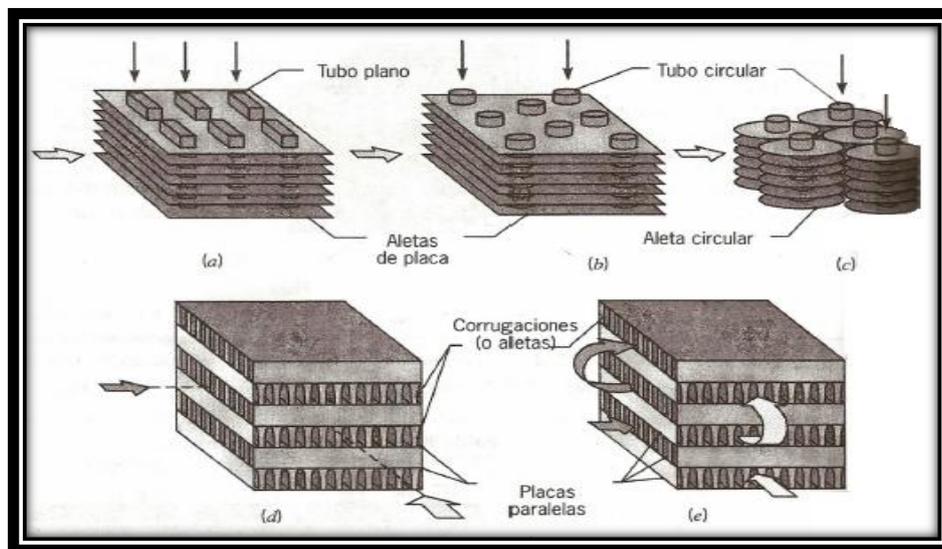


Figura 2.22 Cubiertas de intercambiadores de calor compactos. (a) Tubo con aletas (tubos planos, aletas de placas continuas. (b) Tubo con aletas (tubos circulares, aletas de placas continuas). (c) Tubos con aletas (tubos circulares, aletas circulares). (d) Aletas de placas (un solo paso). (e) Aletas de placas (multipaso)

⁵INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999, p582.

2.1.3.3 Diseño de un intercambiador de calor

Una vez entendido que un intercambiador de calor es un equipo que nos permite la transferencia de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas para su diseño y construcción es necesario considerar varios factores tales como el área superficial de transferencia de calor, los tipos de fluidos que se van a utilizar, el tamaño y el volumen del equipo, material a utilizarse y hasta los costos de fabricación. Pero lo más importante para diseñar un intercambiador de calor es la determinación del coeficiente global de transferencia de calor mejor conocido con la sigla U.

2.1.3.3.1 Coeficiente global de transferencia de calor

Este coeficiente a menudo resulta muy complejo de encontrar y su valor es muy incierto pero es una parte esencial en el diseño de los intercambiadores de calor.

Este coeficiente está definido en términos de la resistencia térmica total para la transferencia de calor entre dos fluidos, el coeficiente se lo encuentra al tomar en cuenta las resistencias de conducción y convección que tiene el fluido cuando este está separado por paredes planas o cilíndricas compuestas. Debemos tener en cuenta que este valor se aplica en superficies limpias y sin aletas.

Durante la operación normal de un intercambiador de calor, a menudo las superficies están expuestas a daños y filtraciones por impurezas, formación de moho, u otras reacciones entre el fluido y el material en la pared. Estas impurezas representadas en láminas o películas sobre la superficie logran aumentar mucho la resistencia a la transferencia de calor entre los fluidos, para ello es común utilizar un factor de resistencia adicional denominado factor de impureza R_f . Este factor depende de muchos factores como la temperatura de operación, la velocidad del fluido y el tiempo de funcionamiento que presente el intercambiador de calor

La siguiente tabla determina donde se encuentra algunos factores de impureza representativos.

Tabla 2.3 Factores de impureza representativos

FLUIDO	R''_f (m².K/W)
Agua de mar y agua tratada para alimentación de una caldera (por debajo de 50 °C)	0.0001
Agua de mar y agua tratada para alimentación de una caldera (por arriba de 50 °C)	0.0002
Agua de río (por debajo de 50 °C)	0.0002-0.001
Aceite de motor	0.0009
Líquidos refrigerantes	0.0002
Vapor (no aceitoso)	0.0001

Fuente: INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999, p 585

El término de conducción de la pared a menudo se suele ignorar porque generalmente se usa una pared delgada de conductividad grande. También a menudo uno de los coeficientes de convección es menor que otro y por esa razón es que se determina el coeficiente global de transferencia de calor. Tomando como ejemplo que uno de los fluidos es gas y el otro fluido es líquido; o se presenta una mezcla líquido-vapor el coeficiente de convección del fluido gas es mucho menor que el de fluido líquido, para eso y con el fin de aumentar el coeficiente de convección del gas se utilizan aletas. A continuación se muestran valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor:

Tabla 2.4 Valores representativos del coeficiente global de transferencia de calor.

COMBINACION DE FLUIDOS	U(W/m ² * K)
Agua con agua	850 - 1700
Agua con aceite	110 - 350
Condensador de vapor (agua en tubos)	1000 - 6000
Condensador de amoníaco (agua en tubos)	800 - 1400
Condensador de alcohol (agua en tubos)	250 - 700
Intercambiador de calor de tubos con aletas (agua en tubos, aire en flujo cruzado)	25 - 50

Fuente: INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999, p 586

En el caso de los intercambiadores de calor tubulares sin aletas la ecuación general es la siguiente:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o}$$

Ec: 2.20

$$= \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}''}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}''}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Ec: 2.21

donde: las superficies interna y externa del tubo a los subíndices *i*, o respectivamente y donde $A_i = \pi D_i L$ y $A_o = \pi D_o L$.

Además en el siguiente grafico se muestra una red de resistencias térmicas asociadas con la transferencia de calor de un intercambiador de calor de tubo doble.

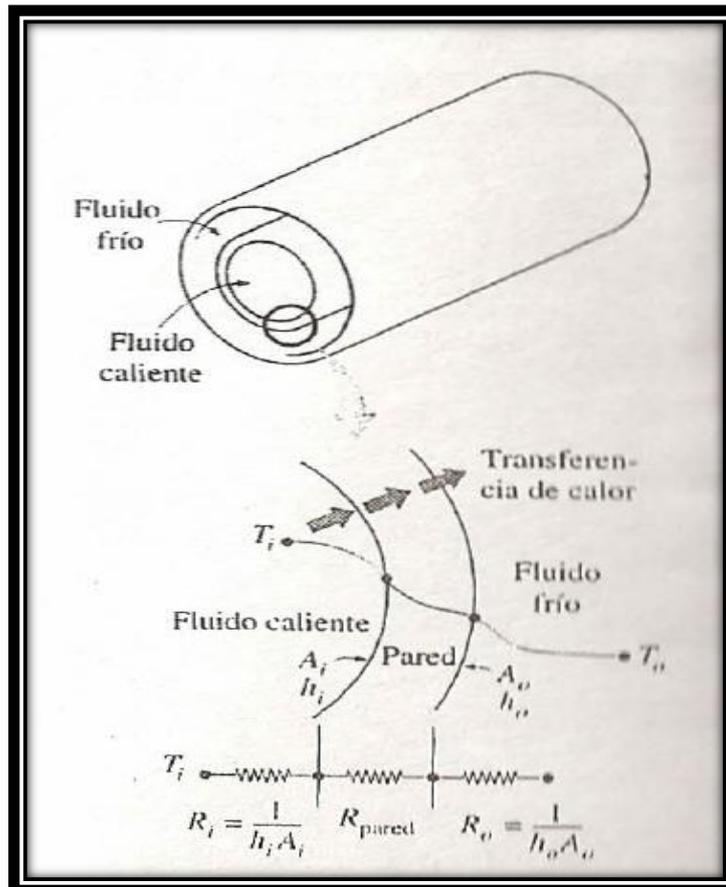


Figura 2.23 Analogía térmica de un intercambiador de calor de tubo doble

El coeficiente global de transferencia de calor se puede determinar a partir del conocimiento de los coeficientes de convección de los fluidos caliente y frío, de los factores de impureza y de los parámetros geométricos apropiados⁶.

2.1.3.3.2 Análisis de los intercambiadores de calor

El objetivo del diseño de los intercambiadores de calor es que un profesional esté en la facultad de poder seleccionar un intercambiador de calor para lograr un cambio de temperatura específica y que también pueda predecir las temperaturas de los fluidos de entrada y de salida de dicho intercambiador de calor, en si el profesional debe ser capaz de lograr deducir el calor transferido (q) definiendo el coeficiente global de transferencia de calor. Estableciendo las temperaturas de entrada y de salida al intercambiador, tomando en cuenta si existe transferencia de

⁶INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999, p586.

calor insignificante entre el equipo y el medio ambiente y por último fijándonos los cambios de energía potencial y cinética; realizando un balance de energía se puede expresar las siguientes ecuaciones:

$$q = \dot{m}_h(i_{h,i} - i_{h,o}) \quad \text{Ec: 2.22}$$

$$q = \dot{m}_c(i_{c,o} - i_{c,i}) \quad \text{Ec: 2.23}$$

La entalpia de fluido esta representada con la letra i , los subíndices h y c se refieren a los fluidos caliente y frio, los subíndices (i) , (o) indican las condiciones de entrada y de salida del fluido.

Si los fluidos no presentan un cambio de fase y se supone calores específicos constantes la expresión se reduce a:

$$q = \dot{m}_h C_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad \text{Ec: 2.24}$$

$$q = \dot{m}_c C_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) \quad \text{Ec: 2.25}$$

Las temperaturas se denominan temperaturas medias del fluido en las posiciones que se encuentran. Es necesario tomar en cuenta que las ecuaciones descritas son independientes del arreglo del flujo y del tipo de intercambiador de calor.

Se puede expresar de otra manera al relacionar la transferencia total de calor q con la diferencia de temperaturas ΔT entre el fluido caliente y el frio teniendo que:

$$\Delta T = T_h - T_c \quad \text{Ec: 2.26}$$

Sin embargo al trabajar con flujos que varían si son fríos y calientes según la posición del intercambiador, se debe trabajar con una ecuación de la siguiente forma:

$$\text{Ec: 2.27}$$

$$q = UA\Delta T_m$$

donde: ΔT_m es una diferencia de temperaturas media apropiada.

Existen dos métodos usados para el análisis de los intercambiadores de calor, el primero es el de la diferencia media logarítmica de temperatura (DMLT) y el segundo es el método de efectividad NUT.

Uso de la diferencia de temperatura media logarítmica (DMLT)

Ya se mencionó que la diferencia de temperaturas que presentan dos fluidos: (caliente y frío) varían a lo largo del intercambiador de calor y para ello se debe tener una diferencia de temperatura media ΔT_m para poder usar en la relación:

$$q = UA\Delta T_m$$

El uso de este método es uno de los más sencillos o mejor dichos básicos para el diseño y cálculo de un intercambiador de calor pero para poder explicarlo de mejor manera se debe tomar en cuenta el tipo de flujo que presenta el fluido en el intercambiador de calor.

Intercambiadores de calor de flujo paralelo

En los intercambiadores de calor de flujo paralelo el ΔT conocido como diferencia de temperatura es demasiado grande entre los fluidos caliente y frío respectivamente, justo en la entrada del intercambiador de calor, pero disminuye en forma exponencial hacia la salida, se comprende que la temperatura del fluido caliente desciende mientras que la temperatura del fluido frío aumenta en el interior y a lo largo del intercambiador de calor, pero se debe tomar en cuenta que la temperatura del fluido frío nunca podrá sobrepasar la temperatura del fluido caliente por más largo que el intercambiador de calor lo sea. A continuación se muestra una figura en la cual se encuentra la distribución de temperaturas para un intercambiador de flujo paralelo.

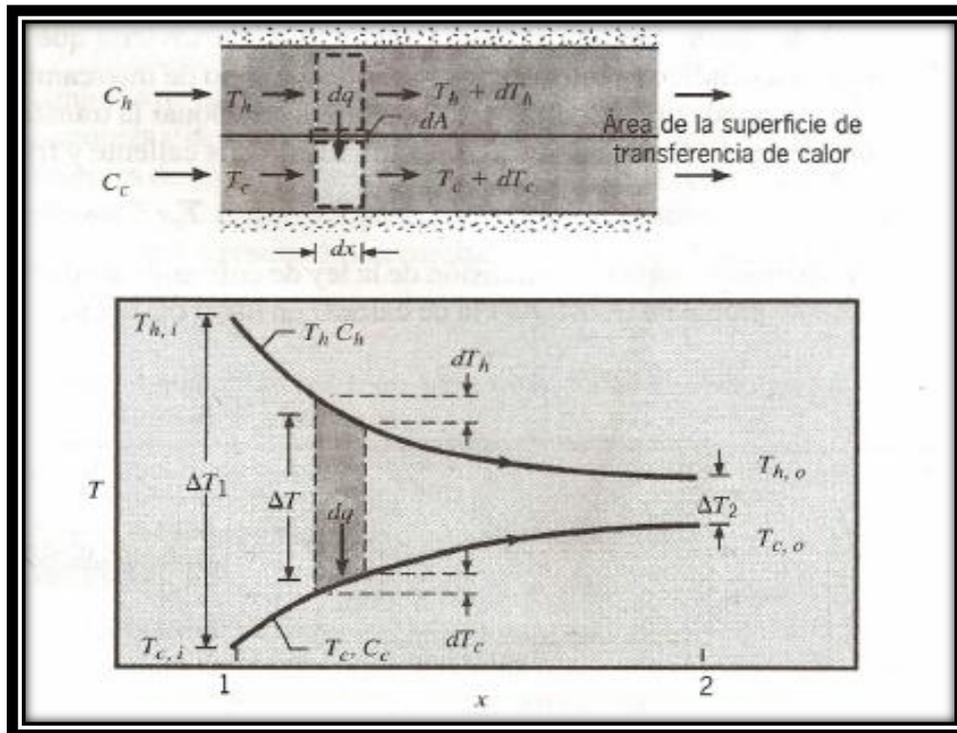


Figura 2.24 Distribución de temperatura para un intercambiador de flujo paralelo.

En la figura los subíndices 1 y 2 indican los extremos opuesto del intercambiador de calor. Es ahí donde se tiene que:

$$T_{h,i} = T_{h,1}, \quad T_{h,o} = T_{h,2}, \quad T_{c,i} = T_{c,1}, \quad \text{y} \quad T_{c,o} = T_{c,2}.$$

En este caso para poder expresar la diferencia media de temperatura ΔT_m se utiliza un balance de energía para elementos diferenciales en los fluidos frío y caliente, a cada elemento se le considera un diferencial de longitud dx y un diferencial de área superficial de transferencia de calor dA . Los balances de energía y sus respectivos análisis están sujetos a las siguientes suposiciones.

1. El único intercambio de calor es entre los fluidos frío y caliente ya que se
2. supone que el intercambiador se encuentra completamente aislado entre
3. sus extremos.
4. La conducción axial a lo largo de los tubos es insignificante.
5. Se desprecia los cambios de energía potencial y cinética.

6. Los calores específicos del fluido son constante.
7. El coeficiente global de la transferencia de calor es constante.

Tomando en cuenta que el coeficiente global de transferencia de calor y los calores específicos pueden cambiar debido a las condiciones de flujo y a las propiedades del fluido en esta aplicación los cambios no son de mayor importancia y para ello trabajaremos con valores promedio tanto para $C_{p,c}$, $C_{p,h}$ y U . Al tomar en cuenta todos estos parámetros el balance de energía quedaría expresado de la siguiente forma:

$$dq = -\dot{m}_h C_{p,h} dT_h \equiv -C_h dT_h \quad \boxed{\text{Ec: 2.28}}$$

$$dq = \dot{m}_c C_{p,c} dT_c \equiv C_c dT_c \quad \boxed{\text{Ec: 2.29}}$$

donde: C_h y C_c son las capacitancias térmicas de los flujos caliente y frío respectivamente. También se expresa la transferencia de calor a través del área superficial dA obteniendo que:

$$dq = U \Delta T dA \quad \boxed{\text{Ec: 2.30}}$$

donde: $\Delta T = T_h - T_c$ indica la diferencia de temperaturas local entre los fluidos caliente y frío. Reemplazando y tratando de obtener una expresión diferencial se tiene que:

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c \quad \boxed{\text{Ec: 2.31}}$$

obteniendo que:

$$d(\Delta T) = -dq \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad \boxed{\text{Ec: 2.32}}$$

Si se sustituye dq e integramos a lo largo del intercambiador de calor se obtiene que:

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{c_h} + \frac{1}{c_c} \right) \int_1^2 dA \quad \text{Ec: 2.33}$$

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{c_h} + \frac{1}{c_c} \right) \quad \text{Ec: 2.34}$$

Así mismo al seguir sustituyendo para C_h y C_c las ecuaciones de balances globales para cada fluido se obtiene:

$$\frac{1}{q} [(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})] = \left(\frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{q} + \frac{T_{c,i} - T_{c,o}}{q} \right) \quad \text{Ec: 2.35}$$

Al conocer que para un intercambiador de calor de flujo paralelo las condiciones son:

$$\Delta T_1 = (T_{h,i} - T_{c,i}) \text{ y } \Delta T_2 = (T_{h,o} - T_{c,o}) \quad \text{Ec: 2.36}$$

se obtiene que:

$$q = UA \left(\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \right) \quad \text{Ec: 2.37}$$

Conociendo todas estas expresiones tanto ecuaciones lineales como ecuaciones diferenciales se puede decir que la diferencia de temperaturas promedio que se debe usar es la diferencia media logarítmica de temperaturas DMLT y como resultado se tiene:

$$q = UA \text{ DMLT} \quad \text{Ec: 2.38}$$

donde:

$$DMLT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_2 \Delta T_1)}$$

Ec: 2.39

Intercambiadores de calor en contraflujo

En el intercambiador de calor de contraflujo a diferencia del intercambiador de flujo paralelo en donde los fluidos frío y caliente interactúan desde la entrada del intercambiador hasta la salida del mismo en el caso del intercambiador de contraflujo los fluidos interactúan viniendo de diferentes entradas haciendo que empiece la transferencia de calor entre las partes más frías de un extremo así como entre las partes más calientes del otro como se muestra en la siguiente figura:

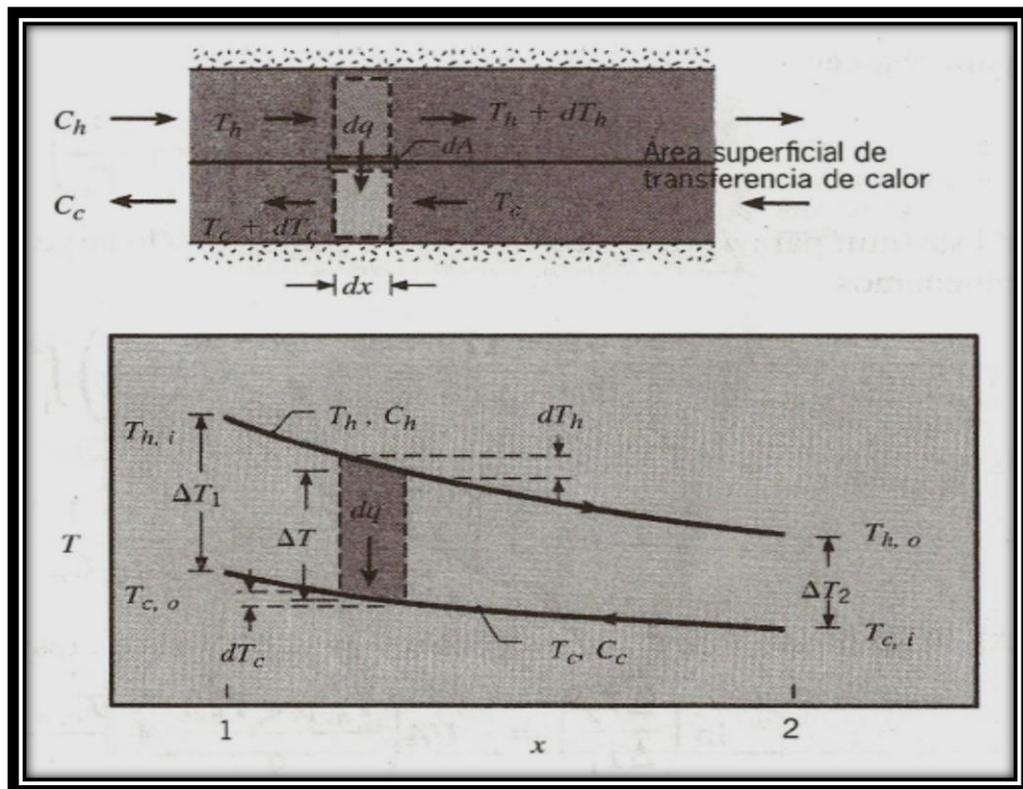


Figura 2.25 Distribución de temperaturas para un intercambiador de calor en contraflujo.

El cambio en la diferencia de temperaturas $\Delta T = T_h - T_c$, con respecto a x no es tan grande en ningún lugar como lo es para la región de entrada del intercambiador de calor de flujo paralelo⁷.

La temperatura de salida del fluido frío puede exceder la temperatura de salida del fluido caliente. Se puede usar las ecuaciones que se aplican en los intercambiadores de flujo paralelo ya que dichas ecuaciones se aplican para cualquier intercambiador de calor pero tomando en cuenta que:

$$[\Delta T_1 \equiv T_{h,1} - T_{c,1} = T_{h,i} - T_{c,o}] \quad \text{Ec: 2.40}$$

$$[\Delta T_2 \equiv T_{h,2} - T_{c,2} = T_{h,o} - T_{c,i}] \quad \text{Ec: 2.41}$$

El área superficial que se requiere para efectuar una transferencia de calor establecida q es menor en el caso del contraflujo que en el de flujo paralelo esto se debe a que la diferencia de temperaturas media logarítmica para el contraflujo excede el flujo paralelo $DMLT_{cf} > DMLT_{fp}$.

Condiciones especiales de operación:

En el amplio estudio de los intercambiadores de calor y su diseño según el flujo se tiene ciertas condiciones especiales detalladas a continuación en el siguiente gráfico:

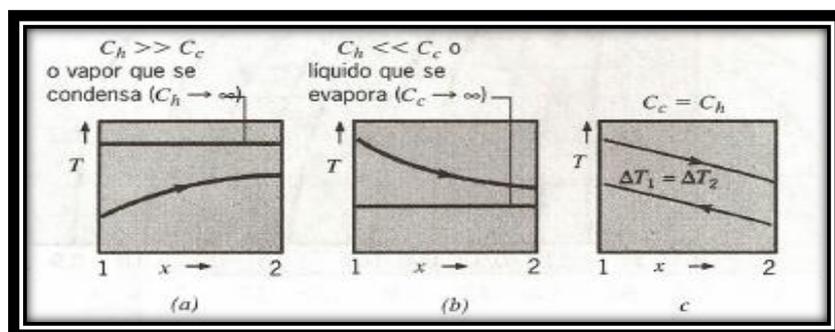


Figura 2.26 Condiciones especiales de intercambiadores de calor

⁷INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999, p597.

En la figura (a) se puede observar que se muestran distribuciones de temperatura en las que el fluido caliente posee una capacitancia térmica de flujo mucho mayor que la del fluido frío esto quiere decir que: $C_h \gg C_c$ siendo $C_h \equiv m_h c_{p,h}$ y $C_c \equiv m_c c_{p,c}$. En este caso la temperatura del fluido caliente permanece constante a lo largo del intercambiador de calor mientras que la temperatura del fluido frío aumenta y tenemos vapor que se condensa.

En el caso de la figura (b) es el fluido frío el que permanece a una temperatura casi uniforme, ($C_c \rightarrow \infty$), mientras que la temperatura del fluido caliente disminuye teniendo así líquido que se evapora. Así mismo en este caso la capacitancia del fluido caliente es menor que la del fluido frío, ($C_h \ll C_c$).

En la figura (c) se presenta el esquema de un intercambiador de calor de flujo cruzado donde las capacitancias térmicas de flujo son equivalentes o iguales ($C_h = C_c$). En este caso el ΔT conocido como diferencia de temperaturas debe estar constante a lo largo del intercambiador de calor, para fines prácticos: $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \text{DMLT}$.

Intercambiador de calor de fluidos múltiples y de flujo cruzado

Los cálculos y fórmulas utilizadas para desarrollar la expresión final del DMLT (diferencia media logarítmica de temperaturas) están limitados para los intercambiadores de flujo paralelo y contraflujo. Resulta muy complejo desarrollar la fórmula para intercambiadores de tubos y corazas de pasos múltiples y de flujo cruzado debido a su complejidad en las condiciones de flujo, para ello es conveniente utilizar un factor de corrección F para el cálculo del DMLT. Dicho factor está representado en las tablas que se encuentran a continuación en donde se puede observar varias configuraciones de intercambiadores de calor de diferentes pasos tanto por la coraza y por los tubos.

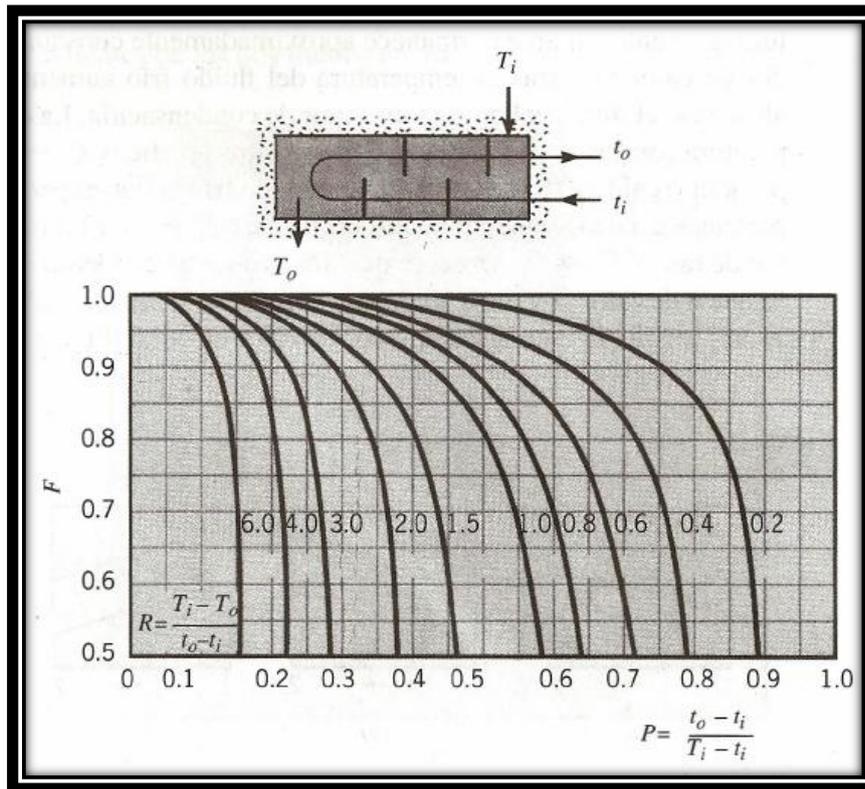


Figura 2.27 Factor de corrección para un intercambiador de calor de coraza y tubo con una coraza y cualquier múltiplo de dos pasos de tubo (dos, cuatro, pasos de tubos)

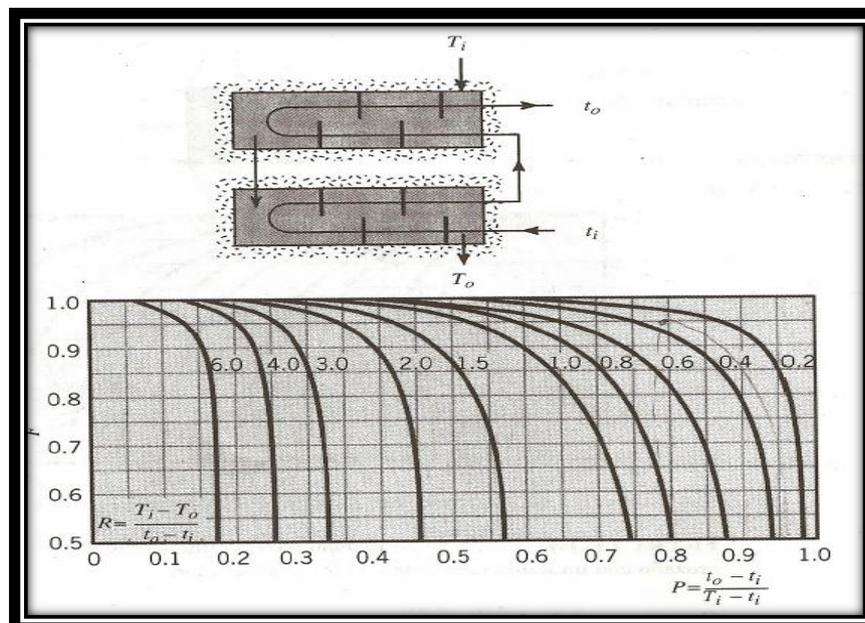


Figura 2.28 Factor de corrección para un intercambiador de calor de coraza y tubo con una coraza y cualquier múltiplo de cuatro pasos de tubo (cuatro, ocho, pasos de tubos)

Análisis del intercambiador de calor - método de eficiencia NUT

Como se definió anteriormente resulta fácil establecer el diseño de un intercambiador de calor usando el método de diferencia media logarítmica de temperatura (DMLT) siempre y cuando se conozca ambas temperaturas de entrada y de salida del fluido. Pero, si solo se conoce las temperaturas de entrada para calcular el DMLT se requiere una de una serie de interacciones que darán un valor aproximado pero no efectivo, en este caso es recomendable utilizar el método de eficiencia NUT.

El número NUT presenta unidades adimensionales y su fórmula está definida por:

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} \quad \text{Ec: 2.42}$$

donde: U es el coeficiente global de transferencia de calor y A es el área superficial de transferencia del intercambiador. El NUT es proporcional al área superficial esto quiere decir que entre mayor sea el intercambiador de calor mayor será el NUT. En los intercambiadores de calor también es necesario señalar otro parámetro con unidades adimensionales llamado relación de capacidades C:

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad \text{Ec: 2.43}$$

donde: la efectividad de un intercambiador de calor es una función entre el número de unidades de transferencia NUT y de la relación de la capacidad C:

$$\epsilon = \text{función} \left(\frac{UA}{C_{min}}, \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \quad \text{Ec: 2.44}$$

$$\epsilon = f(NUT, C) \quad \text{Ec: 2.45}$$

Como ayuda para el estudio se han desarrollado tablas que contienen eficiencias de los intercambiadores de calor como se muestra a continuación:

Figura 2.29 Relaciones de eficiencia de un intercambiador de calor

Arreglo de flujo	Relación
Tubos concéntricos	
Flujo paralelo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
Contraflujo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NUT(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT} \quad (C_r = 1)$
Coraza y tubos	
Un paso por la coraza (2, 4, ... pasos de tubo)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \right. \\ \left. \times \frac{1 + \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-NUT(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
n Pasos por la coraza (2n, 4n, ... pasos de tubo)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$
Flujo cruzado (un solo paso)	
Ambos fluidos sin mezclar	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NUT)^{0.22} \{ \exp[-C_r(NUT)^{0.78}] - 1 \} \right]$
$C_{m\acute{a}x}$ (mezclado), $C_{m\acute{i}n}$ (sin mezclar)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{ -C_r [1 - \exp(-NUT)] \})$
$C_{m\acute{i}n}$ (mezclado), $C_{m\acute{a}x}$ (sin mezclar)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} [1 - \exp[-C_r(NUT)]])$
Todos los intercambiadores ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$

Fuente: INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999, p601.

Algunas gráficas de los intercambiadores más comunes para el cálculo de su eficiencia se muestran a continuación:

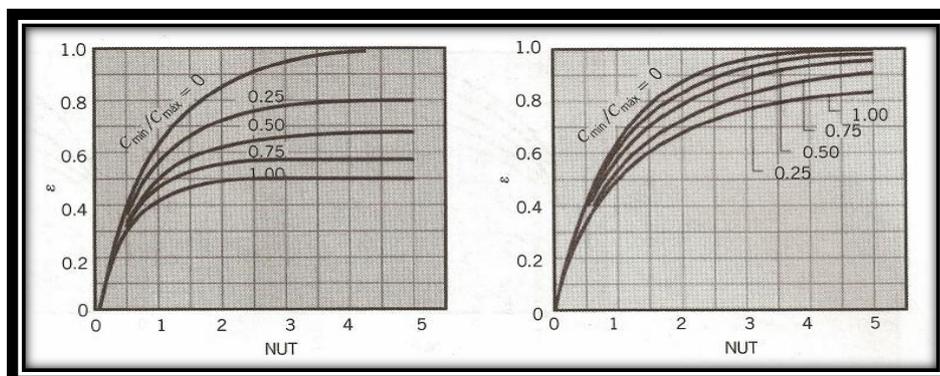


Figura 2.30 Eficiencia de un intercambiador de calor de flujo paralelo y contraflujo.

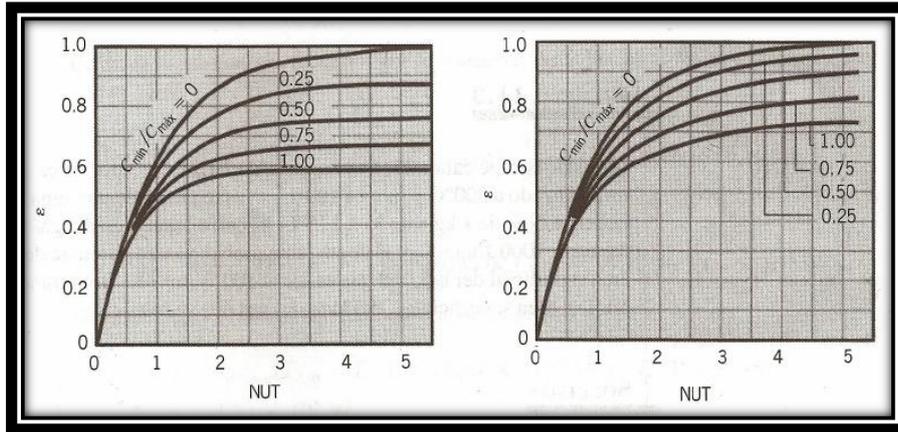


Figura 2.31 Eficiencia de un intercambiador de calor de coraza y tubos con una coraza y cualquier múltiplo de dos pasos por los tubos (dos, cuatro, pasos de tubos) y Eficiencia de un intercambiador de calor de coraza y tubos con una coraza y cualquier múltiplo de cuatro pasos por los tubos (cuatro, ocho, pasos de tubos)

2.1.3.3.3 Diagramas, presión, volumen, temperatura

Las propiedades y sustancias de los fluidos presentan varias propiedades físicas y termodinámicas que deben ser estudiadas tales como: presión, temperatura, volumen, entalpia, entropía. Para utilizar un intercambiador de calor es necesario conocer los fundamentos físicos y termodinámicos de los líquidos con los que se va a trabajar.

Sustancias puras

Una sustancia pura es homogénea, se puede presentar en varias fases, pero cada fase debe tener la misma composición química como por ejemplo el agua es una sustancia pura que se encuentra en fase líquida, el aire es una sustancia pura que se encuentra en su fase gaseosa pero se debe tomar en cuenta que el aire líquido tiene diferente composición química esto quiere decir que el aire no es una sustancia pura si existe en más de una fase.

Propiedades termodinámicas de un fluido

Presión

Denominamos presión al esfuerzo de compresión de un punto en un fluido en reposo. La presión es una variable bastante significativa en la dinámica del fluido ya que las diferencias o gradientes de presión son las responsables del flujo específicamente cuando se transporta en conductos. Otro concepto más sencillo de presión consiste en que es una magnitud física que relaciona la fuerza que actúa sobre una unidad de área. Su fórmula sencillamente puede representarse como:

$$P = \frac{F}{A}$$

Ec: 2.46

Donde F es la fuerza normal al plano y A es el área superficial donde esta aplicada esa fuerza. Las unidades dependen generalmente en que sistema métrico se encuentre pero generalmente en aplicaciones de transferencia de calor se las encuentra tanto en atmosferas, pascales, bares, psi o en kg/m^3 .

$$1\text{atm}=2116 \text{ lb/ft}^2 = 101.300 \text{ Pa.}$$

Temperatura

La temperatura mejor conocida con la sigla T está relacionada con el nivel de energía interna de un fluido. Si se presentan diferencias de temperaturas muy grandes el análisis de la transferencia de calor puede ser bastante importante. Generalmente se trabaja en escalas como: Celsius, Fahrenheit y muchas veces se utiliza temperaturas absolutas como Kelvin y Rankine.

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.69$$

Ec: 2.47

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16$$

Ec: 2.48

Densidad

La densidad de un fluido representado generalmente por la sigla ρ es la propiedad que relaciona la masa del fluido por unidad de volumen. La densidad varía mucho en el caso de los gases aumentando proporcionalmente la presión. La densidad de los líquidos es casi constante se podría decir que aumenta en un 1% cuando la presión se multiplica por un factor de 220 por lo tanto la mayoría de los líquidos que conocemos se los pueden considerar casi incompresibles. Algunos fluidos en general presentan diferentes tipos de densidades es así como la densidad del mercurio el cual es el fluido más denso es igual a: $\rho_{Hg} = 13580 \text{ Kg/m}^3$ y la densidad del hidrogeno el cual es el menos denso es igual a: $\rho_H = 0,0838 \text{ Kg/m}^3$. La densidad del agua es igual a: $\rho_{H_2O} = 1000 \text{ Kg/m}^3$.

Peso específico

Se considera peso específico de un fluido a su peso por unidad de volumen. Al igual que una masa m tiene un peso $W=mg$ la densidad y el peso específico están relacionados por la gravedad como se muestra a continuación:

$$\text{Peso específico} = \rho g$$

Ec: 2.49

Las unidades del peso específico están dadas por el peso sobre unidad de volumen, como por ejemplo lbf/ft^3 o N/m^3 . El peso específico del agua a 1 atm de presión y una temperatura de 20°C es aproximadamente:

$$Pe_{H_2O} = (998 \text{ Kg/m}^3)(9.807 \text{ m/s}^2) = 9790 \text{ N/m}^3 = 62.4 \text{ lbf/ft}^3$$

Volumen específico

El volúmen específico es la inversa de la densidad o el volumen ocupado por unidad de masa:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Ec: 2.50

Entalpia

Es una magnitud termodinámica encargada de expresar una medida de cantidad de energía absorbida o cedida en un sistema termodinámico o la cantidad de energía que el sistema puede intercambiar con el entorno. Está representada por la letra H

Entropía

La entropía es una propiedad termodinámica encargada de describir la irreversibilidad de los procesos termodinámicos, asociados con la segunda ley de la termodinámica. Simbolizado con la letra S es la encargada de medir la cantidad de energía que no puede producirse para producir trabajo.

Viscosidad

Se conoce como viscosidad a la medida cuantitativa de la resistencia de un fluido a fluir, en definición la viscosidad determina la velocidad de deformación del fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante dado. Por ejemplo una persona puede moverse libremente por el aire ya que tiene una viscosidad muy baja, en el agua aumenta la dificultad de movimiento ya que el agua presenta una viscosidad 50 veces mayor, pero aún más difícil fuera moverse en un aceite SAE 30 que es 300 veces más viscoso que el agua.

Actualmente para la mayoría de los fluidos todos los valores dichos anteriormente se encuentran cuantificados en tablas ya que la deducción de sus valores requieren ecuaciones muy complicadas de solución. Las propiedades termodinámicas se encuentran debidamente separadas dependiendo a la región en la que se encuentre el fluido, en el caso del agua, líquido que se va a estudiar en esta tesis, esta presenta diferentes tipos de valores dependiendo en el estado que se encuentre ej.: líquido saturado, vapor sobrecalentado y líquido más vapor.

Superficie P-V-T

Las fases de las sustancias pueden ser: solida, liquida y gaseosa.

A continuación se muestra en la figura el plano P-V-T en la cual se basa toda la termodinámica y todo su estudio.

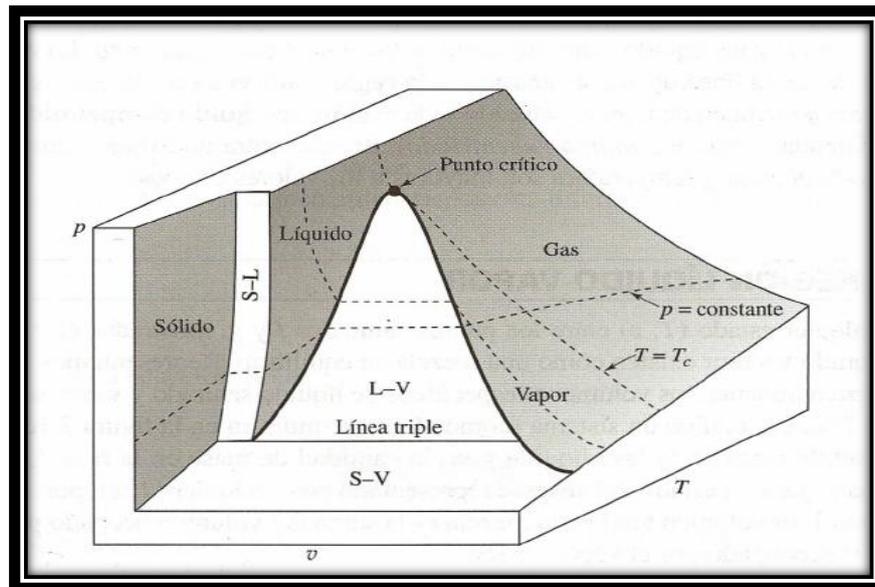


Figura 2.32 Plano P-V-T en termodinámica

De ahí se pueden expresar diferentes graficas donde se puede observar claramente las regiones antes mencionadas: liquido, líquido más vapor, vapor.

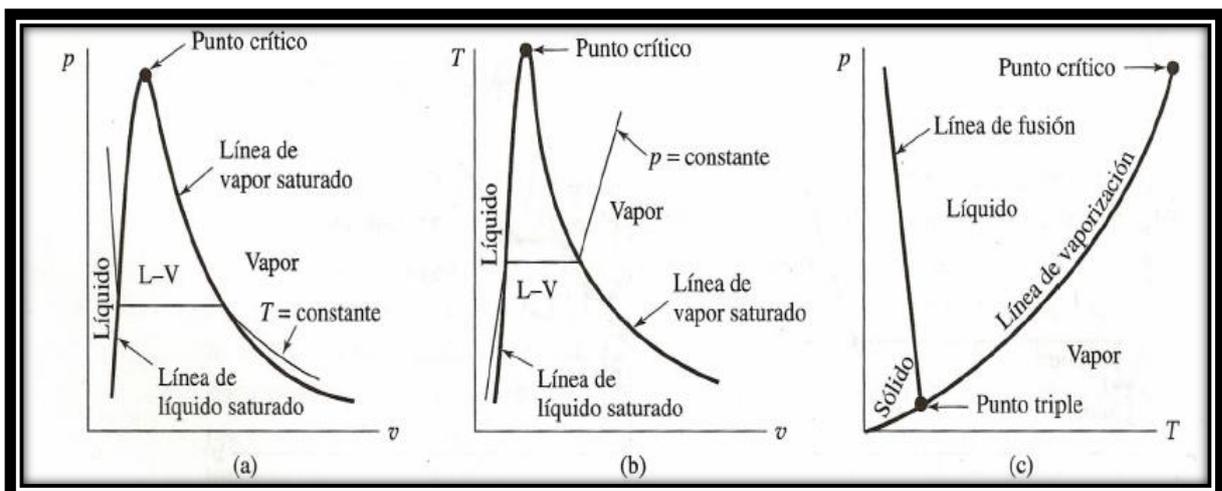


Figura 2.33 Gráficas donde se representan las diferentes regiones de estado

Así mismo al igual que el agua, el aceite presenta propiedades termodinámicas de gran importancia como presión temperatura y volumen pero al referirse a los aceites el principal factor es la viscosidad ya que por esta propiedad se logra diferenciar los tipos de aceites y sus usos. A continuación se muestran graficas del comportamiento de varios aceites dependiendo su grado de viscosidad y su temperatura.

	Aceite 1	Aceite 2	Aceite 3	Aceite 4	Temperatura
Nombre de Producto	SAE 5W-30	SAE 10W-30	SAE 15W-40	SAE 20W-50	Mínima (Celsius)
Viscosidad cSt a 40°C	62.5	69.8	116.0	175.0	22
Viscosidad cSt a 100°C	10.4	10.4	15.6	18.8	

Figura 2.34 Propiedades de los diferentes tipos de aceite

En la figura anterior se muestran cuatro tipos diferentes de viscosidades proporcionadas por un programa encargado de calcular la viscosidades para varios tipos de aceites, en la gráfica que se presenta a continuación se muestran las curvas características de los aceites en un diagrama viscosidad versus temperatura.

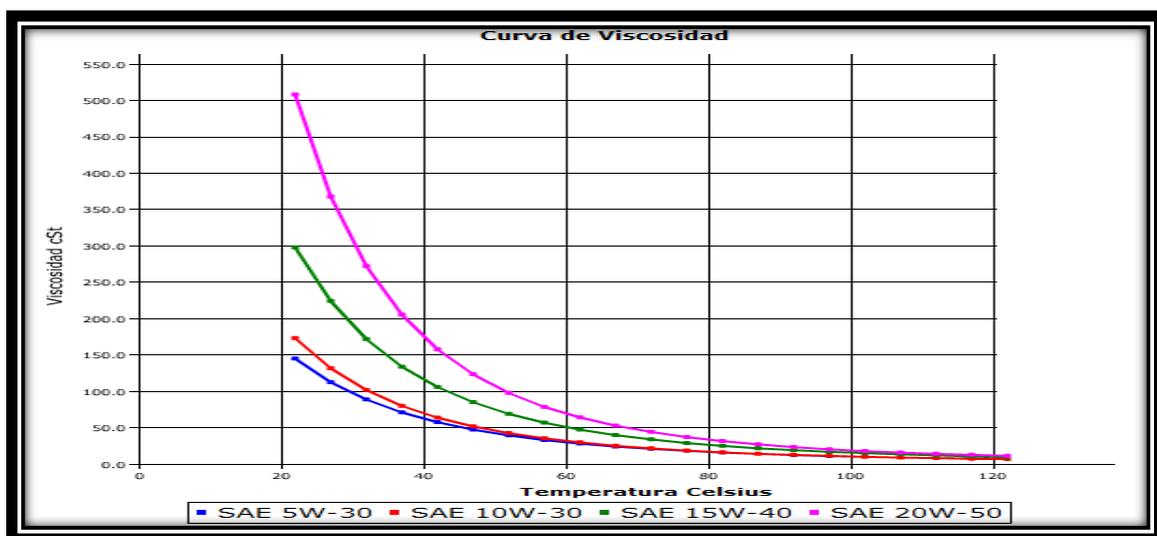


Figura 2.35 Gráficas de viscosidad de diferentes tipos de aceite

2.1.3.3.4 Pérdidas de presión

La pérdida de presión en un intercambiador de calor es un factor muy importante en cuanto a su diseño se requiere. Puede haber varios factores limitantes como el factor económico en cuanto a costos de bombeos o por limitaciones del proceso. En algunos casos las limitaciones suelen ser ambas, para ello es de gran importancia realizar los cálculos respectivos de caídas de presión para el diseño de los intercambiadores de calor.

El objetivo del diseño de un intercambiador de calor es que este sea diseñado para evitar las caídas de presiones improductivas en lo mayormente posible ya que las pérdidas de presión influyen en el costo de los intercambiadores de calor.

En los intercambiadores de calor se toman dos pérdidas de presión importantes, la una es la pérdida de presión en los tubos y la otra es la pérdida de presión en la coraza.

Pérdidas de presión en los tubos

La siguiente fórmula conocida como la ecuación de Darcy es la utilizada para el cálculo de caídas de presión en los tubos:

$$\Delta P_T = f \frac{L}{d_i} \times \frac{V^2}{2g}$$

Ec: 2.51

donde: L es la longitud del tubo, d_i es el diámetro interno del tubo, V es la velocidad del flujo interno y f es el factor de fricción en el cual:

- $f = \frac{64}{Re}$ si $Re < 2000$ Ec: 2.52

- $f = 0.316 Re^{-0.25}$ si $Re \leq 2 \times 10^4$ Ec: 2.53

- $f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2}$ si $3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6$ Ec: 2.54

También para el cálculo del factor de fricción f se utiliza el diagrama de Moody presentado a continuación:

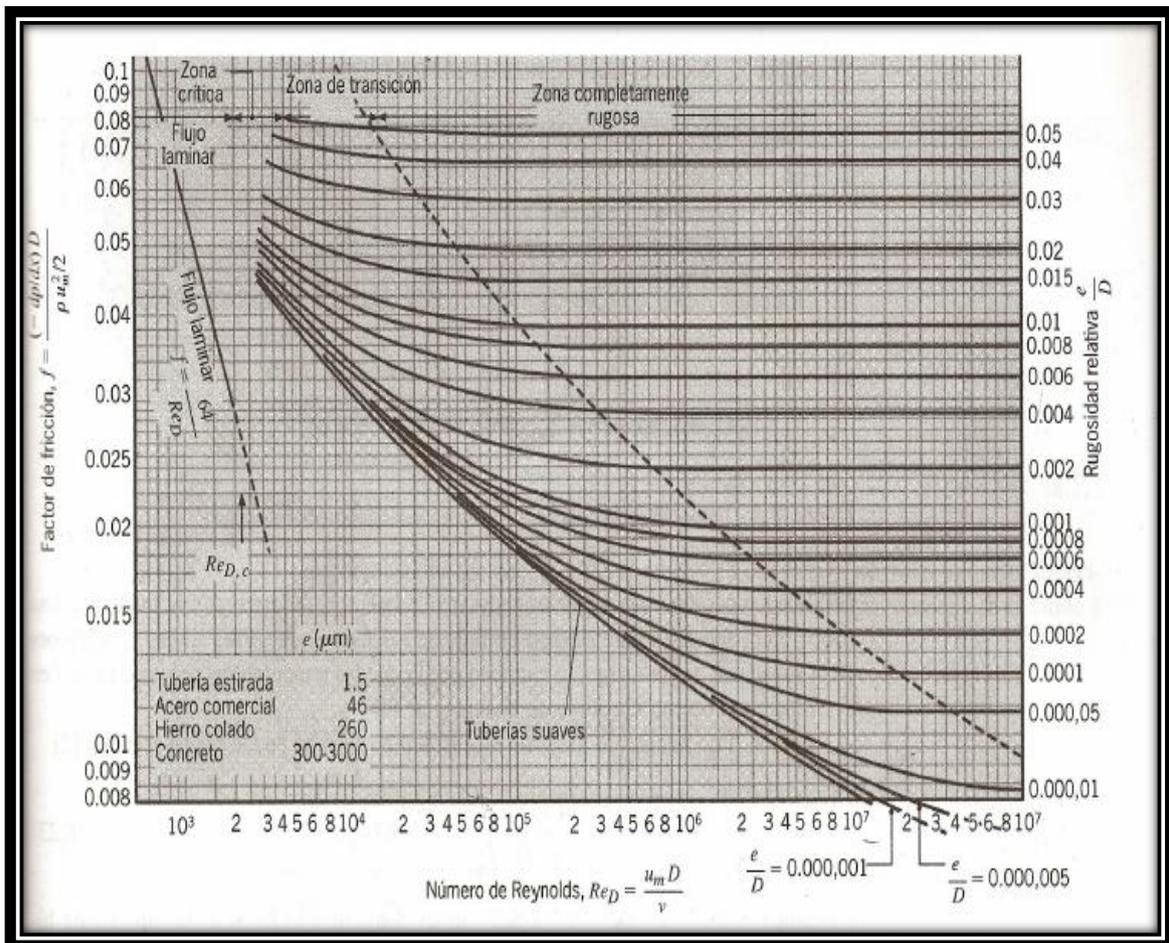


Figura 2.36 Diagrama de Moody para pérdidas de presión

El uso de esta tabla empieza calculando el número de Reynolds y luego la rugosidad relativa que es igual a e/D : donde e es la rugosidad dada en el mismo cuadro para diferentes materiales en (μm) y D es el diámetro de la tubería. Una vez obtenidos los dos valores se ingresa a la curva a buscar a la izquierda cual es el valor de f .

Pérdidas de presión en la coraza

Para el cálculo de pérdidas de presión en la coraza se debe tomar en cuenta que el fluido que circula a través de la coraza debe cruzar el casco guiado por los

desviadores y pasar la ventana o abertura que estos dejen, los desviadores deben estar separados entre 1/5 del diámetro del casco y 30 pulgadas.

En el caso de la coraza al considerar a la coraza como un tubo se puede utilizar la misma fórmula de Darcy expresada anteriormente con la diferencia que se utiliza el diámetro interior de la coraza (DI):

$$\Delta P_T = f \frac{L}{DI} x \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ec: 2.55}$$

- $f = 0.316 Re^{-0.25}$ si $Re \leq 2x10^4$

Ec: 2.56

- $f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2}$ si $3000 \leq Re \leq 5x10^6$

Ec: 2.57

donde DI es el diámetro interno del tubo.

2.1.3.3.5 Cálculos generales.

A continuación se muestra una guía de los cálculos generales que se deben hacer para el diseño de los intercambiadores de calor:

1. Comprobar el BALANCE DE ENERGÍA, se necesita conocer las condiciones del procesamiento, caudales, temperaturas, presiones, propiedades físicas de los fluidos.
2. Asignar las corrientes al tubo y casco.
3. Dibujar los diagramas térmicos.
4. Determinar el número de intercambiadores en serie.
5. Calcular los valores corregidos de la diferencia media de temperaturas
6. (DMLT).
7. Seleccionar el diámetro, espesor, material, longitud y configuración de los tubos, estimar los coeficientes de película y de suciedad. Calcular los coeficientes globales de transmisión de calor.
8. Calcular la superficie de intercambio estimada.
9. Seleccionar el tamaño del casco (utilizando dos pasos en tubo).

10. Calcular las pérdidas de presión en el lado del tubo y recalcular el número de pasos para cumplir con las pérdidas de presión admisibles.
11. Asumir la separación entre desviadores y el área de paso para conseguir la pérdida de presión en casco admisible.
12. Recalcular los coeficientes de película en el lado del tubo y del casco utilizando las velocidades máxicas disponibles.
13. Recalcular los coeficientes globales de transmisión de calor y comprobar si tenemos suficiente superficie de intercambio.
14. Si la superficie de intercambio es muy grande o muy pequeña revisar los estimados de tamaño de carcasa y repetir las etapas 9-13.

Fuente:http://www.unioviado.es/TBR/archives/IBQ%202011/8%20Pedro%20Gonz%E1lez%20Men%E9ndez/8.4/PDF/DEI_07_comp.pdf , Intercambiadores de calor.

2.1.4 IMPORTANCIA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

La importancia fundamental de los intercambiadores de calor es que desarrollen su función de la manera más precisa y exacta posible, por lo cual es necesaria una exactitud al momento de realizar sus cálculos, con el fin de que cumpla con el equilibrio termodinámico para lo cual será aplicado.

Las fronteras como el sobredimensionamiento o subdimensionamiento térmico del intercambiador pueden ser perjudiciales tanto técnica como económicamente en el momento de su construcción.

2.1.4.1 Aplicaciones en la industria

Existen varias razones por la cual los intercambiadores son usados en la industria, en si existen muchas aplicaciones industriales donde participan los intercambiadores de calor que se darán a conocer a continuación según el tipo de intercambiador de calor que se desee utilizar.

2.1.4.1.1 Intercambiadores de placas



Figura 2.37 Intercambiador de calor de placas

- Son utilizados para la industria Farmacéutica, Alimenticia, Química, Petroquímica, Plantas Eléctricas, Plantas Siderúrgicas, Marina y otras más.
- Torres de enfriamiento secas.
- Calentadores de Agua y otros fluidos, mediante vapor.
- Enfriadores de Aceite.
- Recuperadores de Calor, particularmente con diferenciales cortos de temperatura.
- Manejo de sustancias corrosivas, medias.
- Enfriadores de agua salada.
- Para cualquier aplicación donde se requieren diferenciales cortos de temperatura.
- Para usos de refrigeración libres de congelación.

2.1.4.1.2 Intercambiadores compactos de placas soldadas

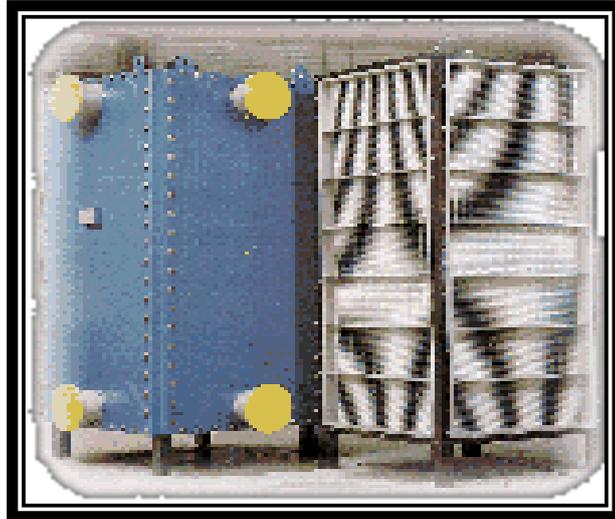


Figura 2.38 Intercambiador compacto de placas soldadas

Estos intercambiadores son usados para aplicaciones de refrigeración como Evaporadores, Súper calentadores y Evaporadores de cascada (condensadores).

Son usados también para procesos como:

- Calentadores mediante vapor
- Condensador de vapor
- Enfriadores de Nitrógeno Líquido
- Enfriadores de Aceite Hidráulico.

2.1.4.1.3 Intercambiadores de doble tubo

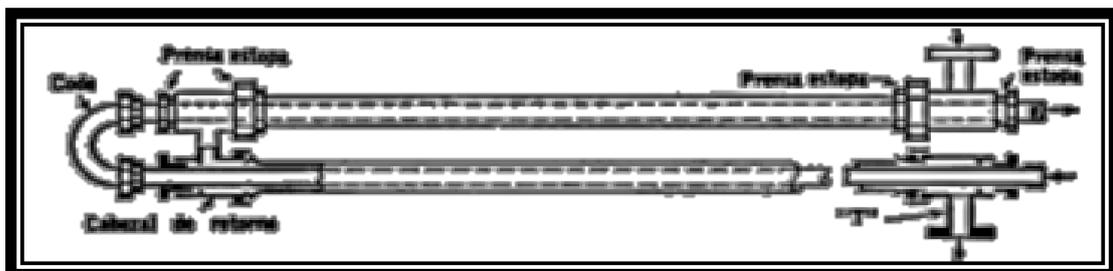


Figura 2.39 Intercambiador de calor de doble tubo



Figura 2.40 Intercambiadores de doble tubo industriales

- Utilizados para trabajar en aplicaciones líquido-líquido y en general para los procesos donde los intercambiadores de placas no se puedan utilizar.
- Industrias Alimentaria, Química, Petroquímica, Farmacéutica.

2.1.4.1.4 Intercambiadores de tubo y coraza.



Figura 2.41 Intercambiadores de calor de tubo y coraza

- Vapor / Agua, para condensar vapor y calentar agua.
- Aceite / Agua, para enfriar aceite en sistemas de lubricación o hidráulicos y transformadores eléctricos.

- Vapor/Combustóleo, para calentar combustóleo en tanques de almacenamiento, fosas de recepción y estaciones de bombeo.
- Aire / Agua, para enfriar aire como Post-enfriadores de compresor de aire (after - coolers).
- Refrigerante / Agua, para condensar refrigerantes.
- Intercambiadores de calor para procesos químicos y petroquímicos; fabricados en acero al carbón, acero inoxidable y aceros especiales.
- Chilers (Intercambiadores de calor para enfriar agua con gas refrigerante) para unidades de agua helada.
- Inter - Enfriadores y Post - Enfriadores para compresores Atlas Copco.
- Inter - enfriadores y Post - Enfriadores para compresores Ingellson Rand.

2.1.4.1.5 Intercambiadores de casco y tubo de grafito

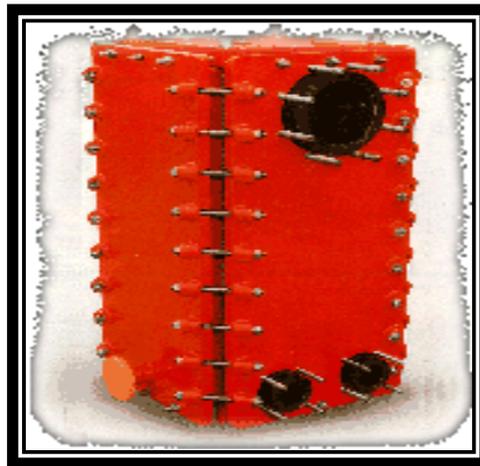


Figura 2.42 Intercambiador de casco y tubo de grafito

- Para Procesos químicos altamente corrosivos (Manejo de ácidos y bases en bajas concentraciones).
- Diseño, fabricación y reparación.

2.1.4.2 Mantenimiento

Los intercambiadores de calor tienen como principio de funcionamiento la circulación de varios fluidos a través del interior de su estructura, debido a la

operación y al tiempo de utilización del equipo se suelen producir obstrucciones en las zonas de flujo y es evidente que se requiere de un buen mantenimiento para su óptima utilización.

Algunas causas por la cual se debe realizar mantenimiento a los intercambiadores de calor son:

- Corrosión en la estructura del intercambiador
- Descomposición de los fluidos (aceites minerales, alimentos.)
- Deposición de sólidos disueltos en los fluidos (incrustaciones de carbonatos)

Básicamente al tener todas estas características nombradas anteriormente en el interior de los equipos, se suelen producir incrustaciones en la superficies tanto internas como externas de los tubos y esto a su vez genera una resistencia tanto en el paso del fluido como en la transferencia de calor deseada en el intercambiador de calor generando pérdidas y poca eficiencia en los equipos.

Resulta un poco difícil establecer un procedimiento generalizado para el mantenimiento de los intercambiadores de calor ya que existe una gran variedad de tipos de intercambiadores y múltiples procesos, pero pudiendo determinar las directrices que permiten tener un mantenimiento efectivo en casi todos los casos.

El propósito del mantenimiento en todos los intercambiadores de calor radica en la eliminación de los depósitos que obstruyen o impiden la correcta transferencia de calor en los equipos. En los intercambiadores de calor de tubo y coraza estos depósitos suelen producirse por deposición de sólidos tanto en las paredes externas como internas de los tubos como también en la superficie interna de la coraza.

En los intercambiadores de placas estas incrustaciones se presentan entre las láminas haciendo que se dificulte la transferencia de calor entre los fluidos y además creando restricciones a la circulación del fluido en estos equipos.



Figura 2.43 Mantenimiento a un intercambiador de calor

Las técnicas de mantenimiento varían según el tipo de incrustación que se presente y de la configuración de los intercambiadores de calor como por ejemplo en un mantenimiento del intercambiador de calor de placas fijas se debe aplicar una limpieza mediante cepillos o alta presión por el interior de los tubos. También en las áreas confinadas como en la carcasa es bueno realizar una limpieza de tipo química para que permita disolver a través de la circulación del químico la mayor cantidad de sólidos adheridos a la superficie. Los químicos utilizados para la limpieza en las áreas confinadas suelen variar según sea el material de construcción del equipo, así como el fluido que vaya a manejar el intercambiador de calor, por ejemplo en el caso de que el fluido sea agua o vapor se utilizan desincrustantes que pueden estar compuestos por ácidos fuertes o débiles dependiendo el material de construcción con el que esté hecho el intercambiador de calor.

En el caso de los intercambiadores de calor de acero al carbono o acero inoxidable se utilizan productos como: ácido clorhídrico, ácido fosfórico, ácido cítrico o cualquier solución que permita disolver los minerales producto de las deposiciones del agua o del vapor, es importante saber que estas soluciones deben ser

aplicadas conociendo y estudiando las reacciones que puedan generarse al mezclarse con los materiales de construcción del intercambiador.

En los intercambiadores de calor de haz removible o de tubería U se hace más sencillo el mantenimiento ya que se tiene la posibilidad de extraer la coraza del intercambiador de calor para poder actuar directamente sobre la superficie interna y externa del tubo así como también tener un acceso directo en el interior de la coraza. El mantenimiento se lo hace por medio de cepillos de alambres circulares mechas o latiguillos de alta presión en el interior de los tubos y alta presión por el lado externo de la tubería. La coraza se la limpia por medio de elementos mecánicos o agua a presión.

En los intercambiadores de calor de placas dependiendo el estado en que se encuentren pueden limpiarse con químicos desincrustantes en el caso de que sean equipos operados con agua y desengrasantes en el caso que sean equipos operados con aceites. Si aparecieran en estos equipos fugas o fallas en los sellos es recomendable sustituir los empaques entre placas y limpiar cada placa con agua a presión y químicos.

En los intercambiadores de calor de flujo cruzado se procede a realizarse el mantenimiento de manera similar en el interior de los tubos según sea accesible el interior del equipo (tapas removibles o agujeros de limpieza). En el área de superficie extendida se procede a limpiar con agentes químicos adecuados para el material a remover adicionando agua a presión.



Figura 2.44 Mantenimiento a un intercambiador de calor multitubo

En los equipos involucrados en procesos como agua helada, condensadores de gases, serpentín de inmersión es de suma importancia estudiar detalladamente el mantenimiento correcto que se debe aplicar tomando en consideración que la finalidad del mantenimiento es la de limpiar las incrustaciones de las superficies de contacto de los fluidos para una mejor transferencia de calor.

El mantenimiento en los intercambiadores de calor es de suma importancia y se lo debe realizar para evitar que el equipo trabaje con niveles elevados de incrustaciones o con superficies totalmente obstruidas ya que esto generaría una deficiencia en la transferencia de calor, los equipos son sensibles a la deposiciones de sólidos y a las obstrucciones debido a que las superficies son generalmente porosas, especialmente en el caso de los intercambiadores de tubo y coraza. Las deposiciones de agua dura producen corrosión puntual así como también abrasión de la superficie. Otra grave consecuencia que se produce en los intercambiadores de calor si no reciben su respectivo mantenimiento es los depósitos de agua pueden llegar a un punto de cristalización que imposibilitaran el uso de químicos produciendo así una pérdida completa del equipo, esto suele pasar especialmente en los intercambiadores de placas fijas o áreas confinadas.

2.1.5 IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE ACEITES EN EL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

Los aceites industriales son productos ampliamente usados en un sin número de actividades y los residuos como los aceites usados pueden causar graves daños al medio ambiente y a la salud humana; por ello, es necesario realizar un estudio de impacto ambiental en el uso de los aceites.

Los aceites tienen un papel importante en casi todas las empresas relacionadas con la energía y mecánica ya sea para poder mantener equipos y herramientas en continuo funcionamiento como para poder realizar lubricación y limpieza de las mismas. Por esa razón en la actualidad no hay industria que no requiera el uso de aceites para garantizar el correcto funcionamiento de las mismas. El uso de aceites generan residuos que es necesario saberlos manejar y tratar de forma segura con el fin de evitar afectar al medio ambiente y a la salud humana.

El personal de la empresa ya sean operarios o trabajadores que estén en contacto directo con estos productos, debe familiarizarse con el uso y tratamiento de los aceites haciendo que esto sea una de las responsabilidades más grandes que tengan dichas personas con el objetivo de cumplir los requisitos legales que se requiera.

Dentro de las normativas europeas, los aceites usados están establecidos como residuos peligrosos por los efectos y consecuencias que estos tienen sobre el medio ambiente y la salud.

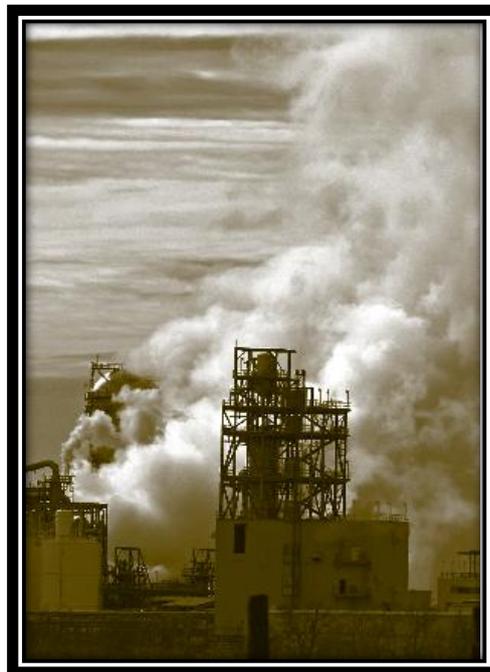


Figura 2.45 Impacto ambiental por el uso de materiales derivados del petróleo.

2.1.5.1 Efectos contra la salud

Los efectos sobre la salud se deben a que los aceites contienen aditivos muy peligrosos y tóxicos durante su uso. Los aceites están compuestos por una gran cantidad de sustancias peligrosas para la salud humana como lo son las partículas metálicas ocasionadas por el desgaste de las piezas o la generación de humo y gases que el aceite produce debido a la combustión de motores y por el

calentamiento debido a la fricción entre piezas de maquinarias. A continuación se presentan algunos efectos contra la salud que el aceite produce:

- Irritaciones del tejido respiratorio por la presencia de gases que contienen aldehídos, cetonas, compuestos aromáticos.
- La presencia de elementos químicos como: Cl (Cloro), NO₂ (dióxido de nitrógeno), SH₂ (ácido sulfhídrico), Sb (antimonio), Cr (Cromo), Ni (Níquel), Cd (Cadmio), Cu (Cobre) afectan las vías respiratorias superiores y los tejidos pulmonares.
- Producción de efectos asfixiantes, impidiendo el transporte de oxígeno, por contener monóxido de carbono, disolventes halogenados, ácido sulfhídrico.
- Efectos cancerígenos sobre próstata, vejiga y pulmón por presencia de metales como plomo, cadmio, manganeso.

2.1.5.2 Efectos contra el medio ambiente

Debido a que el aceite es un derivado del petróleo tiene un gran alto índice de contaminación sobre el medio ambiente, es por eso que es de suma importancia saber tratar los aceites y especialmente los aceites usados. Algunas de las maneras en como los aceites afectan al medio ambiente se darán a conocer a continuación:

- Vertidos en el agua: Los aceites vertidos en el agua generan una película impermeable entre la atmósfera y la superficie acuática que ocasiona una disminución del oxígeno disuelto en el agua. Prácticas como verter aceites a través de los sistemas de alcantarillado provocan serios daños en las estaciones depuradoras.
- Vertidos en suelos: Los aceites vertidos en los suelos lo recubren y provocan una disminución del oxígeno. El humus vegetal se va degradando y finalmente ocasiona una pérdida de la fertilidad. Por filtración pueden contaminar aguas subterráneas (contaminación de acuíferos, pozos.)
- Emisiones a la atmósfera: La combustión de aceites usados, provoca emisiones a la atmósfera de metales como el plomo, gases tóxicos

(compuestos de cloro, azufre y fósforo) y otros elementos con los correspondientes efectos tóxicos para la atmosfera.

Fuente:http://www.omaaragon.org/riesgos/ficheros/_3514.pdf , Impacto ambiental de los aceites

2.2 SISTEMAS ANEXOS

Los sistemas anexos son los encargados de complementar el uso de los equipos principales en el caso de los intercambiadores de calor para lograr el objetivo que es la construcción de un banco de pruebas, entre estos están el sistema de refrigeración, sistema de calentamiento, sistema de circulación del fluido y la Instrumentación.

2.2.1 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Se puede definir la refrigeración como cualquier proceso en el que se elimine el calor; como la rama de la ciencia que trata con los procesos de reducción y mantenimiento de la temperatura de un espacio o material a temperatura inferior con respecto de los alrededores correspondientes⁸.

Para poder lograr lo dicho anteriormente, se debe sustraer el calor del cuerpo que va a ser refrigerado y transferirlo a otro cuerpo cuya temperatura será inferior a la del cuerpo refrigerado en si el calor eliminado del cuerpo refrigerado será transferido a otro cuerpo. Es así como podemos decir que la refrigeración y la calefacción son extremos opuestos del mismo proceso.

2.2.1.1 Necesidad de aislamiento térmico

En los sistemas de refrigeración el calor fluye siempre de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura teniendo siempre un flujo de calor en dirección de la región refrigerada de los alrededores calientes. Para lograr

⁸ROY J. DOSSAT, Principios de refrigeración, traducido del inglés por Armando Garza Cárdenas, 1era edición, Compañía Editorial Universal, México 1986, p109.

limitar el flujo de calor hacia las regiones refrigeradas es necesario aislar la región de sus alrededores con un buen material aislante térmico o de calor.

2.2.1.2 La carga de refrigeración

Se denomina carga de refrigeración o carga térmica a la velocidad en la cual el calor debe ser eliminado de un espacio o material refrigerado con el fin de mantener las condiciones deseadas de temperatura. En todos los sistemas de refrigeración la carga de enfriamiento es igual a la suma de las ganancias provenientes de diferentes fuentes:

- El calor transmitido por conducción a través de paredes aisladas.
- El calor que debe ser eliminado del aire caliente que llega al espacio a través de puertas que se abren y se cierran.
- El calor que debe ser eliminado del producto refrigerado para reducir la temperatura del producto a la temperatura de almacenamiento.
- El calor cedido por la gente que trabaja en el espacio y por motores, alumbrado y otros equipos que producen calor y que operan en dicho espacio.

2.2.1.3 El agente refrigerante

Se denomina refrigerante a la sustancia encargada de absorber calor o a la sustancia que es un agente de enfriamiento en cualquier proceso de refrigeración. Los procesos de enfriamiento pueden clasificarse como sensibles o latentes según el efecto que tenga el calor absorbido sobre el refrigerante. Se dice que un proceso de enfriamiento es sensible cuando el calor absorbido causa un aumento de temperatura en el refrigerante, mientras que cuando el calor absorbido causa un cambio en el estado físico del refrigerante ya sea una vaporización o fusión se dice que el proceso de enfriamiento es latente. En ambos casos si el proceso de refrigeración es secuencial la temperatura del refrigerante debe mantenerse en forma continua por debajo de la del material o del espacio que está siendo refrigerado.

2.2.1.4 CICLO DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración empleado para el banco de pruebas es el de sistema de compresión-vapor el cual ocupa los siguientes elementos principales: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador. Existen otras partes de gran importancia en el sistema de refrigeración compresión-vapor como tanques receptores, tuberías de descarga, válvulas de servicio, acoples. A continuación se muestra el esquema de un sistema de refrigeración con sus partes principales:

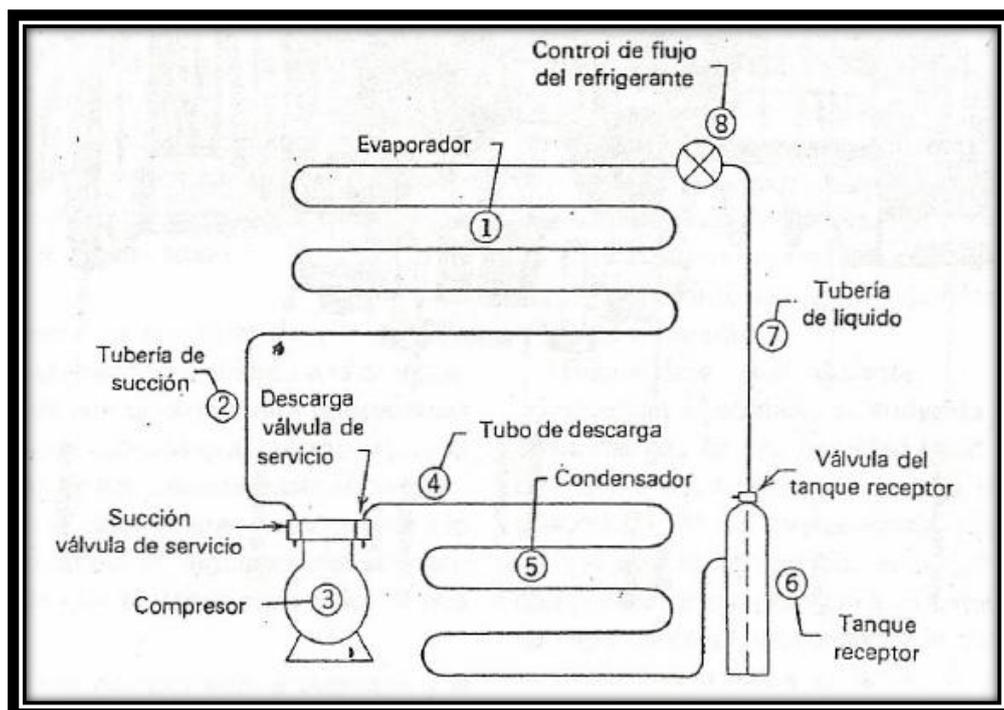


Figura 2.46 Partes de un sistema de refrigeración

1. Evaporador: Su función es proporcionar una superficie de transferencia de calor con el objetivo que pueda pasar calor del espacio o producto refrigerado hacia el refrigerante que se encuentra en estado vapor.
2. Tubo de succión: Su función es transportar el vapor de baja presión del evaporador hasta la entrada de succión del compresor.
3. Compresor de vapor: Su función es eliminar el vapor del evaporador y de elevar la temperatura y presión del refrigerante para que pueda ser luego condensado a través de un medio condensante disponible.

4. Tubo de descarga: Su función es entregar vapor de presión y temperatura alta desde la descarga del compresor hasta la entrada del condensador.
5. Condensador: Su función es proporcionar una superficie de transferencia de calor cuya función será de hacer pasar calor del vapor refrigerante caliente hacia el medio condensante (tanque receptor).
6. Tanque receptor: Almacena el líquido condensado de tal manera que el líquido siempre esté disponible a las necesidades del evaporador.
7. Tubería de líquido: Conduce el refrigerante líquido desde el deposito hasta el control de flujo del refrigerante.
8. Control del flujo de refrigerante: También conocido como válvula de expansión, su misión es la de medir la cantidad apropiada de refrigerante usada en el evaporador y reducir la cantidad de presión del líquido que llega al evaporador de tal manera que la vaporización del líquido en el evaporador se efectuó a la temperatura deseada.

A continuación se presenta en la figura 2.46 como es el comportamiento del líquido refrigerante en el sistema y en si como es el ciclo de refrigeración.

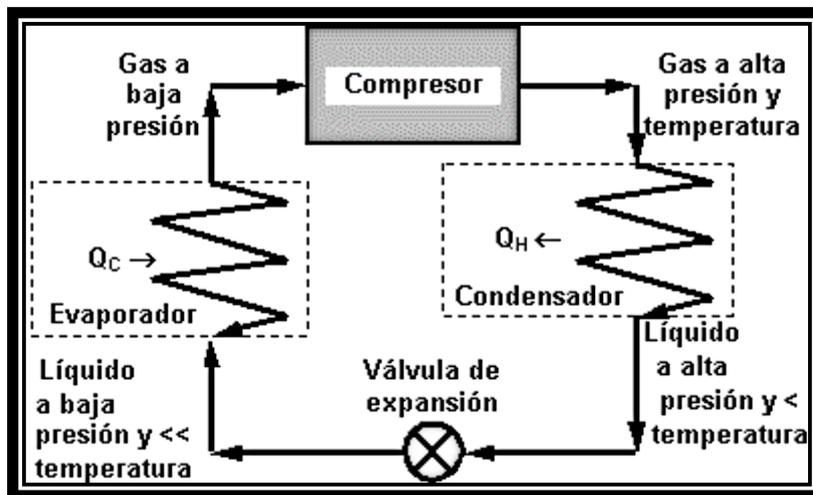


Figura 2.47 Ciclo de refrigeración

El ciclo comienza cuando el líquido refrigerante sale a presión y temperatura alta en forma de gas a través del compresor para luego transformarse en líquido a alta temperatura y presión por medio del condensador, luego de eso mediante la válvula de expansión se baja la temperatura y presión del refrigerante para posteriormente entrar al evaporador que es el que a la larga va a enfriar el líquido

que se va a utilizar para el banco de pruebas, en este caso el agua mediante el evaporador, el refrigerante cambiara nuevamente a estado gaseoso pero a baja presión listo para ingresar de nuevo al compresor y seguir así el ciclo de refrigeración.

2.2.2 SISTEMA DE CALENTAMIENTO

El sistema de calentamiento, al contrario del sistema de refrigeración es el sistema diseñado en el cual se logre generar o ganar calor, esto se lo logra a través del diseño de un sistema de calentamiento que cubra los requerimientos principales como el de generar carga y energía térmica al fluido a calentarse, controle el nivel y rango de temperatura del proceso y la presión de operación. Para el diseño del calentador es necesario considerar la relación de los fluidos que transfieren calor así como también las propiedades que afectan la eficiencia térmica y el comportamiento de la operación.

En el sistema de calentamiento existen componentes y sistemas auxiliares que deben definirse en una ingeniería básica y que deberán cumplir con los requisitos del proceso. El sistema de calentamiento tiene la función de calentar el aceite (fluido caliente utilizado en el banco de pruebas) sus componentes son:

- Calentador de aceite (unidad de recuperación de calor o resistencia).
- Tanque de almacenamiento de aceite.
- Filtro de aceite.
- Bomba de recirculación de aceite.
- Instrumentación y control.
- Tuberías y accesorios de conexión.

Así mismo como todo sistema específico necesita de sistemas auxiliares de funcionamiento los cuales son:

- Válvulas de control y seguridad.
- Sistemas eléctricos.

- Aislamiento térmico de tuberías, accesorios y equipos.
- Soporte estructural.
- Protección contra descargas eléctricas.

El sistema de calentamiento para el aceite requiere de todos los componentes nombrados anteriormente para su correcto funcionamiento, todos sus componentes son de gran importancia al momento del diseño y construcción.

Existen varios tipos de calentadores de aceites, uno de ellos son los calentadores a fuego directo los cuales deben cumplir con todas las normas exigidas, el calentador debe ser de tiro forzado con un sistema de precalentamiento de aire.

Otro calentador de aceite es el utilizado en este proyecto denominado calentador de aceite por resistencia el cual consiste en una resistencia eléctrica en forma de tubo o serpentín que nos permite por medio de la energía eléctrica lograr calentar el aceite hasta la temperatura deseada o a la temperatura máxima para la cual fue diseñada la resistencia.



Figura 2.48 resistencias eléctricas para calentar el aceite

2.2.2.1 Funcionamiento

La resistencia eléctrica es colocada en el interior del envase almacenador de aceite para luego empezar a calentar el fluido al ser encendida a través de energía eléctrica. Así es como se logra subir la temperatura del aceite para después trasladarlo al intercambiador de calor a través de bombas encargadas de transportar dicho fluido. Una vez que completa la circulación en todo el equipo

vuelve al tanque almacenador para volver a repetir el mismo proceso obteniendo así siempre aceite caliente.

2.2.3 SISTEMA DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO

El sistema de circulación del fluido va de la mano con el sistema de refrigeración para el fluido frío, como el del sistema de calentamiento para el fluido caliente. Establecido anteriormente los sistemas de refrigeración y de calentamiento están encargados de distribuir los fluidos respectivos a las temperaturas deseadas. Se puede decir que el sistema de circulación del fluido es la unión de los sistemas de refrigeración y calentamiento a través de sus elementos principales de distribución (las bombas centrífugas tanto para el agua como para el aceite).

Las bombas centrífugas en los dos sistemas tienen la función de transformar la energía mecánica en energía cinética y potencial a través de un impulsor rotatorio en su interior. El fluido entra por el centro del impulsor rotatorio que dispone de unos álabes para conducir el fluido y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado a gran velocidad hacia el exterior donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba que a su vez lo conduce hacia la tubería de salida. A continuación se muestra un sistema generalizado de una bomba centrífuga.

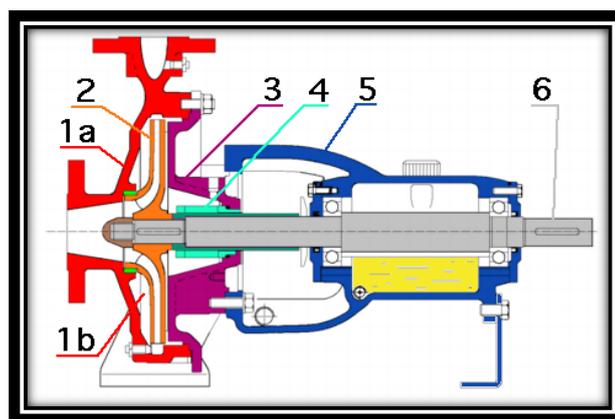


Figura 2.49 Esquema y partes de una bomba. (1a) Carcasa.(1b) Cuerpo de bomba. (2) Rodete.(3)Tapa de impulsión.(4) Cierre del eje. (5) Soporte de cojinetes.(6) Eje.

Para la elección de las bombas utilizadas en los sistemas de circulación del fluido es necesario tomar en cuenta los siguientes factores:

- Caudal requerido.
- Cabeza requerida (este aspecto está fuertemente influenciado por las características del sistema).
- Fluido a bombear.
- Temperatura del fluido.

Los distribuidores de bombas manejan algunos diagramas establecidos por el fabricante uno de ellos es el diagrama cabeza - caudal el cual permite elegir a través de la curva la correcta potencia de la bomba en base a la presión y caudal requerido para el sistema.

2.2.4 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación consiste en la parte electrónica principalmente analógica encargada del manejo y control de los instrumentos para su uso y sus mediciones. Los instrumentos en el banco de pruebas son utilizados para medir las variables físicas y químicas que presenten cada equipo. Otra función de la instrumentación es la de tener un control tanto en el equipo como en el manejo de datos obtenidos. En el caso del banco de pruebas la instrumentación se encargara de controlar y medir las variables como lo es la presión, temperatura y caudal, para ello existen varios instrumentos detallados a continuación.

2.2.4.1 Medidores de presión

Los medidores de presión son utilizados para determinar la presión absoluta, de vacío o diferencial según sea el caso requerido. En el área industrial todos los equipos ya sean tuberías o recipientes necesitan un sistema de control y medición de presión para su correcta utilización. Existen varios instrumentos en la industria encargados de medir esta importante variable física pero para ello se tiene que diferenciar los tipos de presión que existen:

Presión absoluta: Es la presión que mide un fluido con respecto al cero absoluto o también conocido como vacío perfecto.

Presión atmosférica: Esta es la presión ejercida por la atmosfera de la tierra medida a través de un barómetro.

Presión manométrica: Esta presión es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica.

Presión diferencial: es la que representa la diferencia de presiones que hay entre dos presiones absolutas.

Vacío: es la presión medida por debajo de la presión atmosférica, es decir la diferencia entre la presión atmosférica y la presión absoluta⁹.

Para el banco de pruebas existen instrumentos para medir la presión tanto en los intercambiadores de calor como en los sistemas anexos en los que se vaya a utilizar uno o varios fluidos, estos instrumentos son conocidos como manómetros. Un manómetro simplemente es un instrumento que permite medir la presión del fluido en recipientes o tuberías cerradas. Los manómetros miden la diferencia de presiones entre la presión absoluta y la presión manométrica. La presión que dan estos instrumentos se expresa ya sea por encima o por debajo de la atmosférica.

Uno de los manómetros más utilizados son los tipos Burdon, estos medidores utilizan como elemento sensible un tubo metálico que se encuentra doblado o torcido y que pertenece a una sección transversal aplanada. Uno de los extremos del tubo permanece cerrado haciendo que se acumule la presión a ser medida en el otro lado del tubo. Mientras la presión va aumentando el tubo empezará a formar una sección circular y comenzará a enderezarse permitiendo así tener una medición a través de una aguja colocada mediante mecanismos dentro del equipo.

⁹ <http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>, Presion

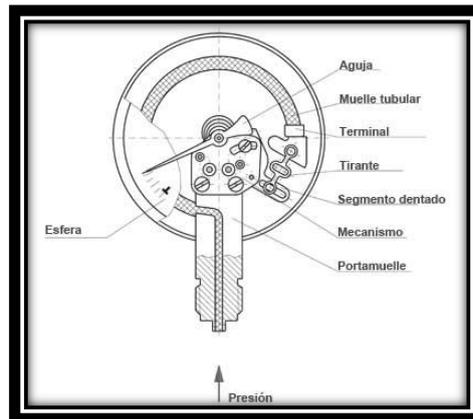


Figura 2.50 Esquema y partes de un manómetro

2.2.4.2 Medidores de temperatura

Otra variable física a obtener en el banco de pruebas es la temperatura de los fluidos, tanto en la entrada y salida de los intercambiadores como también en los sistemas anexos ya sea en el sistema de refrigeración como en el de calentamiento. Actualmente en la industria es de vital importancia tener un buen manejo y control de los valores de temperaturas en los equipos ya que un mal manejo podría producir averías en los sistemas e incluso desastres que pudieran poner en riesgo la vida útil del equipo e incluso la de las personas, para evitar ello es necesario contar con equipos de mucha precisión y exactitud logrando tener así una correcta medición. Existen varios instrumentos encargados de medir la temperatura como por ejemplo termómetros, termocuplas, termo resistencias entre otros, cada uno con su respectivo rango de apreciación y de error. En el banco de pruebas se utilizaron termocuplas para medir las temperaturas que existen en el interior de los intercambiadores de calor así como también termómetros digitales para apreciar las temperaturas tanto del aceite como del agua en los sistemas anexos de refrigeración y calentamiento respectivamente.

Termocuplas

Las termocuplas son básicamente transductores de temperaturas, es decir que son dispositivos encargados de convertir una magnitud física en una señal eléctrica. Las termocuplas están constituidas por dos alambres metálicos diferentes que son los encargados de desarrollar un diferencial de potencial eléctrico entre

sus extremos libres que es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas estas puntas y la unión¹⁰.

Las termocuplas pueden ser fabricadas de metales puros o aleaciones y la característica más importante es que estas pueden llegar a medir grandes rangos de temperatura entre 70 y 1700 grados kelvin.

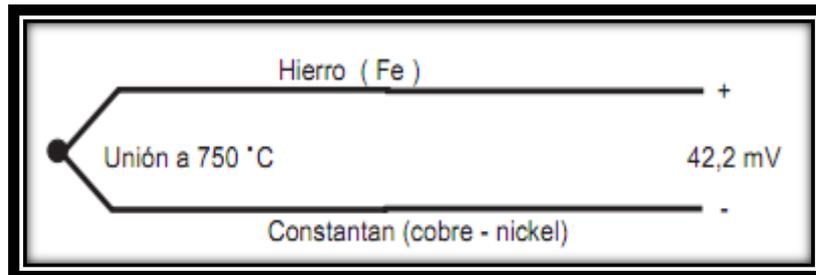


Figura 2.51 Esquema de una Termocupla

Existe una variedad de tipo de termocuplas y las más utilizadas en la industria son las termocuplas tipo J o del tipo K.



Figura 2.52 Foto de termocuplas industriales

¹⁰ <http://www.fisicarecreativa.com/guias/sensores-temp.pdf>, Termocuplas.

Las termocuplas tipo J se utilizan principalmente en la industria del plástico, goma (extrusión e inyección) y fundición de metales a bajas temperaturas (Zamac, Aluminio).

Las termocuplastipo K, se usa típicamente en fundición y hornos a temperaturas menores de 1300 °C, por ejemplo fundición de cobre y hornos de tratamientos térmicos.

También existen otros tipos de termocuplas como las del tipo R, S, B, estas son utilizadas generalmente en la industria siderúrgica (fundición de acero). Y finalmente las de tipo T que eran usadas anteriormente en la industria alimenticia pero han sido desplazadas por regulaciones y normas en esta industria.

Fuente: http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo_03/termocuplas.pdf,
Termocuplas.

2.2.4.3 Medidores de caudal

Así como la temperatura y la presión, es necesario también controlar la siguiente magnitud física denominada caudal; en un banco de pruebas de un intercambiador ya que se manejan fluidos en todo el sistema y es necesario llevar un control y seguimiento de los fluidos de trabajo. Se requiere conocer varios parámetros antes de elegir el medidor de caudal necesario, estos son:

Rango: Para tener una buena elección de un medidor de caudal es necesario conocer el rango que da el equipo utilizado, esto es saber el orden de la magnitud general de velocidad así como el rango de variaciones esperadas. Los medidores que están al alcance del mercado pueden medir flujos desde varios mililitros por segundo en el caso de prácticas de laboratorio como varios metros cúbicos por segundo en el caso de procesos industriales como en sistemas de drenajes, manejo de agua potable o entre otros.

Exactitud requerida: La exactitud es un factor importante cuando se trata de elegir un medidor de caudal, en el mercado se puede encontrar medidores que

proporcionen un 5% de exactitud del flujo real, siempre y cuando este sea instalado adecuadamente y considerando todas las normas que lo regulan. La exactitud es directamente proporcional con el precio del equipo en el mercado, obviamente entre más exactitud se requiera mayor será el costo del equipo.

Tipo de fluido: Los fluidos de trabajo especialmente sus propiedades afectan directamente la elección de los medidores de caudal. La principal consideración es identificar si el fluido es líquido o gaseoso para luego considerar otras propiedades importantes como son: viscosidad, temperatura, corrosión, conductividad eléctrica, claridad óptica, propiedades de lubricación y homogeneidad.

Para la construcción del banco de pruebas se utilizó un tipo de caudalímetros de área variable conocidos con el nombre de rotámetros. Estos son equipos simples, confiables y económicos, están compuestos por tres partes principales: Los flotantes, los tubos cónicos y las escalas. A medida que el fluido ingresa ejerce una cierta energía necesaria para empujar el flotante hasta que el área anular (anillo entre el flotante y el tubo) sea lo suficientemente grande para permitir el paso del fluido que a su vez es medido por la escala que se tenga en el equipo. A mayor caudal mayor será la elevación del flotante, así como a menor caudal este descenderá.



Figura 2.53 Fotografía de rotámetros utilizados en la industria

2.2.5 ACEITE API

La Sigla API (American Petroleum Institute - Instituto Americano del Petróleo) no es más que un parámetro de calidad mínimo que deben tener los aceites. El instituto americano del petróleo (API) está encargado de aprobar las licencias de aceites para garantizar su calidad en la utilización de los mismos; es decir, si un fabricante de aceites quiere garantizar la calidad de su producto debe registrar su fórmula con el API.

La API clasifica a los aceites según el nivel de servicio y el tipo de motor en el que se va a utilizar. En el caso de los motores a gasolina la API ha asignado a los aceites con la letra "S" que proviene del termino en inglés (spark - chispa) mientras que para motores a diesel la API ha asignado la letra "C" que proviene del termino (compression – compresión). La segunda letra que acompaña a la "S" o "C" significa la actualización de los rangos según el modelo y año de fabricación, es así como un aceite para motores a gasolina "SJ" es más actualizado que un aceite "SH". Lo mismo ocurre para los aceites con la sigla "C" que corresponden a los motores a diesel.

Existe otra organización denominada SAE (Society of Automotive Engineers – Sociedad de Ingenieros Automotrices) encargada de clasificar a los aceites según su grado de viscosidad los cuales son de dos tipos: monogrados (SAE40, SAE50) y multigrados (SAE 20W40, SAE 20W50).

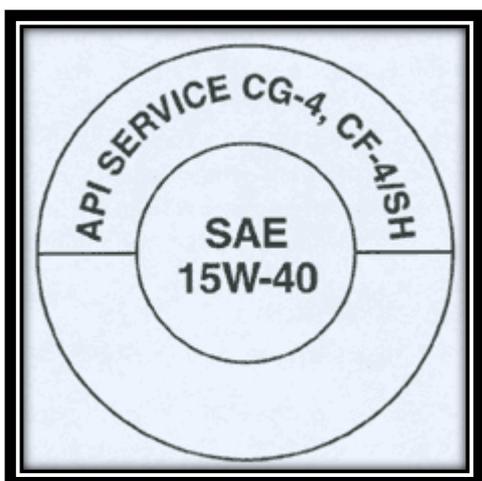
La clasificación SAE se basa en la viscosidad del aceite a dos temperaturas en grados Fahrenheit (0°F y 210°F) equivalentes en centígrados a (-18°C y 99°C).

Tabla 2.5 Clasificación de los aceites según su grado SAE.

Grado SAE	Viscosidad Cinemática cSt @ 100°C
0W	3,8
5W	3,8
10W	4,1
15W	5,6
20W	5,6
25W	9,3
20	5,6 - 9,3
30	9,3 - 12,5
40	12,5 - 16,3
50	16,3 - 21,9
60	21,9 - 26,1

Fuente: <http://www.solomantenimiento.com/m-aceite-lubricante.htm>, Tipos y clasificación de los aceites lubricantes.

El aceite SAE 15W40 indica la viscosidad medida a -18°C y a 99°C grados y esto quiere decir que el aceite se comporta en frío como un SAE 15 y en caliente como un SAE 40. Para elegir un mayor rango para una mayor protección en frío se necesita que el primer número sea lo más bajo posible así como que el segundo número sea lo más elevado posible en el caso que se requiera una mayor protección en caliente.



PARTE SUPERIOR CG-4:

C = Para Motores Diesel
 G = Letra de orden alfabético según el desarrollo
 4 = Motor de cuatro tiempos

PARTE SUPERIOR CF-4

C = Para Motores Diesel
 F = Letra de orden alfabético según el desarrollo
 4 = Motor de cuatro tiempos

Figura 2.54 Nomenclatura de un aceite API

Parte central: SAE 15w40

Grado SAE de viscosidad

15= Entre más bajo sea este número indica que el motor arrancará más rápido en invierno y que el aceite trabajara en mejor forma a bajas temperaturas en las partes críticas del motor.

40 = Este número es el de temperatura de alta viscosidad, indica el espesor y el cuerpo en el aceite para tener una buena lubricación en la temperatura de operación.

2.2.5.1 Propiedades

Los aceites lubricantes se logran distinguir entre ellos según sean sus propiedades o según sea su comportamiento en las maquinas. Para poderlos utilizar de una manera óptima es necesario conocer bien las propiedades de los aceites a ser usados. Debiendo tomar en cuenta que un buen aceite lubricante en el tiempo de uso no debe formar excesivos depósitos de carbón ni tener una tendencia a formación de ácidos o lodos, tampoco debe congelarse a bajo grados de temperatura. Las propiedades más importantes de los aceites son:

Color: Al observar un aceite lubricante a través de un embace o recipiente transparente nos puede dar una idea del grado de pureza o de refinado que tiene el aceite.

Densidad: La densidad de un aceite lubricante se logra medir mediante la comparación entre los pesos de un volumen determinado de aceite con el peso de igual volumen de agua destilada.

Índice de viscosidad: El índice de viscosidad es el valor que indica la variación de viscosidad del aceite con respecto de la temperatura. Cuando se calienta un aceite siempre este presenta mayor fluidez y su viscosidad disminuye caso contrario es cuando el aceite trabaja a bajas temperaturas este se vuelve más espeso y su viscosidad aumenta.

Untuosidad: La propiedad que representa mayor o menor adherencia a las superficies metálicas a lubricar se la denomina Untuosidad y se puede observar cuando el espesor de la película de aceite se reduce al mínimo sin llegar a la lubricación límite.

Punto de inflamación: Esta propiedad es la que determina la temperatura mínima a la cual los vapores desprendidos se inflaman en presencia de un medio de calentamiento.

Punto de combustión: Se considera punto de combustión cuando el aceite empieza a incendiarse de un modo permanente después del punto de inflamación ardiendo durante algunos segundos.

Punto de congelación: Es la propiedad que presenta el aceite cuando este pierde su capacidad de comportarse como un fluido y mostrarse así como una sustancia sólida a bajas temperaturas.

Acidez: Se denomina acidez o acidez mineral cuando el aceite presenta una reacción de acidez excesiva debido a un mal refinado o un mal tratamiento en su elaboración, ya que los aceites son productos obtenidos del petróleo pueden presentar una reacción ácida o alcalina.

Índice de basicidad T.B.N: El índice de basicidad es la propiedad que tienen los aceites de neutralizar los ácidos formados por la combustión de los motores, si se analiza el T.B.N (total base number), indica dicha propiedad y también establece el tiempo en el que se debería cambiar los aceites en los motores para su correcto funcionamiento.

Demulsibilidad: Esta propiedad nos indica la mayor o menor capacidad que tiene el aceite de separarse del agua, esto es lo contrario de emulsibilidad.

Fuente:<http://members.fortunecity.es/100pies/Lubricantes/lubricantes2.htm>, Características de los aceites

2.2.5.2 Rangos de temperatura

Los rangos de temperatura en los aceites dependen directamente de la viscosidad, es necesario determinar la viscosidad del aceite basándose en la temperatura ambiente esperada durante el periodo de cambios de aceite, como ya se ha mencionado anteriormente la nomenclatura API y SAE clasifica los tipos de aceites según el tipo de motor y su viscosidad requerida a diferentes grados de temperatura. A continuación se muestra una figura donde se ilustra los diferentes tipos de aceites según su rango de temperatura:

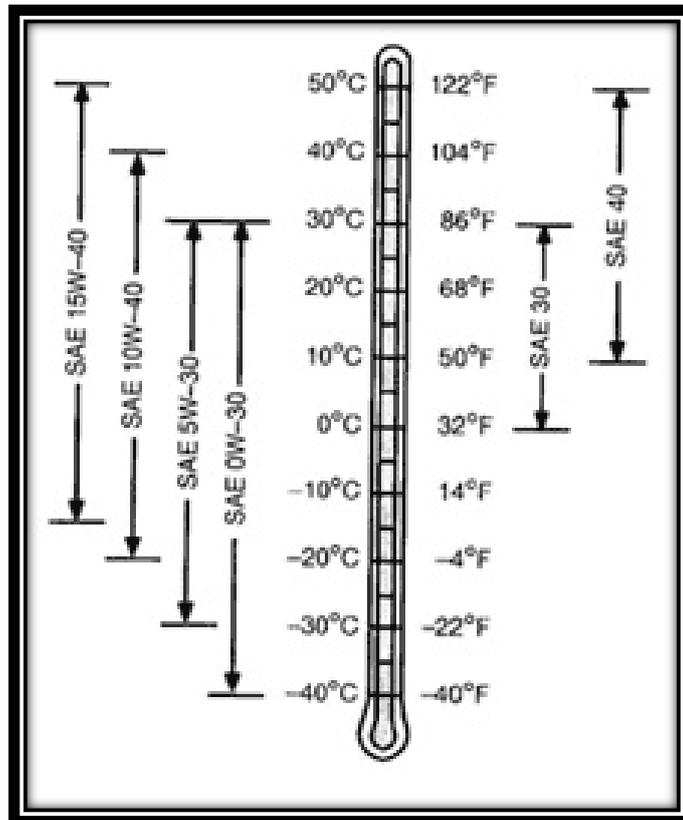


Figura 2.55 Rangos de temperatura de los aceites

2.3 INGENIERÍA CONCEPTUAL

2.3.1 NORMATIVA Y REGULACIONES

En los intercambiadores de calor el diseño se rige en base a normas y regulaciones como el de la gran mayoría de los equipos para procesos industriales. Para el caso de los intercambiadores de calor de tubo y coraza el código más empleado es el ASME Boiler and Pressure Vessels Code (Código para Calderas y Recipientes a Presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).

La aplicación de dicho código, requiere de un amplio criterio para la interpretación correcta del mismo en el diseño. Asimismo existen las normas “TEMA” (Standard of Tubular Exchangers Manufactures Association) cuyas finalidades regulan los criterios de diseño y fabricación de los equipos.

2.3.1.1 Código ASME

El código ASME es un conjunto de normas, especificaciones de diseño, formulas y criterios desarrollados en base a años de desarrollo y de experiencia. El código ASME se clasifica en diferentes secciones citadas a continuación:

- SECCION I Calderas de Potencia.
- SECCION II Especificación de Materiales.
- SECCION III Recipientes para Plantas Nucleares.
- SECCION IV Calderas de Calentamiento.
- SECCION V Pruebas No Destructivas.
- SECCION VI Cuidado y Mantenimiento de Calderas de Calentamiento.
- SECCION VII Cuidado y Mantenimiento de Calderas de Potencia.
- SECCION VIII Recipientes a Presión (Div. 1 y Div. 2).
- SECCION IX Procedimientos para Calificar Soldaduras.
- SECCION X Recipientes a Presión de Fibra de Vidrio con Plástico.
- SECCION XI Reglas para Inspección de Sistemas de Enfriamiento de Reactores Nucleares.

Siendo la sección VIII la que se utilizara para el diseño y construcción de los intercambiadores de calor se revisará brevemente la División 1 y 2

DIVISIÓN 1: La división 1 a su vez está dividida en tres subsecciones:

La subsección "A" que cubre los requisitos generales para todos los recipientes sujetos a presión, la subsección "B", que cubre los requisitos específicos para los diferentes métodos utilizados en la fabricación de dichos recipientes y la subsección "C", que cubre los requisitos específicos para los materiales empleados en la fabricación.

En sí, la división 1 es un grupo de normas de diseño para las partes constitutivas de los recipientes sometidos a presión, las cuales están basadas en la teoría de membrana. Las fórmulas que determinan los espesores en todas las partes sujetas a presión, obedecen a los esfuerzos directos permisibles, basados en $1/4$ de Ft (Esfuerzo último a la tensión).

Los criterios anteriores, se contemplan para equipos, cuya presión no exceda 3,000 Lb/pulg².

DIVISIÓN 2:

Esta división cubre solamente a los recipientes que son instalados en una localización determinada y para un servicio específico, donde exista un estricto control de los materiales, operación, construcción y mantenimiento. En relación a la División 1, ésta es más restrictiva en la selección de los materiales y aunque el valor de la intensidad de los esfuerzos permisibles, se basa en $1/3$ de Ft, exige una evaluación de esfuerzos en todos los elementos que constituyen el equipo, siendo aplicable esta División para aquellos cuya presión es 3,000 Lb/pulg² o mayor.

2.3.1.2 Normas tema

Las causas que motivaron la realización de estos estándares esencialmente fueron, asociar a los fabricantes de intercambiadores de calor en los Estados

Unidos de Norteamérica, con la finalidad de unificar sus criterios en la solución de los problemas presentados por los usuarios de equipos que constantemente reclamaban por la calidad y tolerancias proporcionadas en el diseño y fabricación de los mismos.

2.3.1.2.1 Contenido general

Estas normas se han dividido en las partes siguientes:

- Nomenclatura
- Tolerancias de Fabricación
- Fabricación en General, Información Necesaria
- Instalación, Operación y Mantenimiento
- Normas Mecánicas “TEMA“ CLASER”
- Normas Mecánicas “TEMA“ CLASEC”
- Normas Mecánicas “TEMA“ CLASEB”
- Especificación de Materiales
- Normas Térmicas
- Propiedades Físicas de Fluidos
- Información General
- Prácticas Recomendadas

Con respecto a las Normas Mecánicas, es importante señalar que las diferentes CLASES se desarrollan con las mismas partes; sin embargo, su diferencia radica principalmente en factores de diseño para cada una de ellas. Por otra parte conviene indicar que siempre se deberá especificar la categoría (CLASE), que desea emplearse de estas normas. Por ejemplo TEMA “R”, TEMA “B” o TEMA “C”, pero nunca especificar solamente TEMA, ya que carecería de sentido.

La CLASE “R”, es parte de las normas donde los requisitos de diseño, fabricación y materiales son los más estrictos. Esta CLASE se especifica generalmente para condiciones severas de operación y procesos de petróleo.

La CLASE “C”, se especifica para procesos y aplicaciones generales, siendo los requisitos menos estrictos que para el caso anterior. Esto último se aplica también para la CLASE “B” con la única diferencia que los equipos clasificados para esta categoría generalmente se encuentran en procesos químicos.

2.3.1.2.2 Generalidades

Los intercambiadores de calor como su nombre lo dice se encargan de transferir calor entre dos fluidos, este intercambio energético se da por conducción, radiación y por convección, se clasifica principalmente en dos puntos, por su funcionamiento térmico y por su tipo de construcción.

Por su funcionamiento térmico, se clasifica de la siguiente manera:

- Rehervidores
- Evaporadores
- Precalentadores
- Calentadores
- Enfriadores
- Condensadores
- Postenfriadores
- Reactores

Por su construcción

- Cambiadores de tubo y coraza
- Cambiadores de tubos concéntricos
- Cambiadores de Multitubos
- Cambiadores enfriados por aire
- Cambiadores de placas

2.3.1.2.3 Nomenclatura e identificación de intercambiadores de calor

La nomenclatura utilizada por “TEMA”, adopta tres literales que representan:

- Cabezal de distribución o entrada
- Tubo y Coraza
- Cabezal de retorno

Así por ejemplo, un cambiador de calor del tipo “AES”, estará constituido por un cabezal de distribución “A”, una coraza “E” y un cabezal de retorno “S”.

El tamaño de un cambiador de calor se indica por dos números:

1. Diámetro interior de la coraza
2. Longitud recta de los tubos de transferencia

Elementos constitutivos de un cambiador de calor

Coraza: Es un cuerpo cilíndrico construido de una sola pieza que puede ser un tubo sin costura o una placa rolada que contendrá en su interior el haz de tubos y a través de los cuales circula el fluido que baña el exterior de los tubos de dicho haz.

Haz de tubos: Es el elemento formado por los tubos de transferencia, situado en el interior de la coraza y orientado paralelamente a ella. Consta también de deflectores, los cuales además de soportar los tubos y crear turbulencias dirigen el fluido que circula por el exterior de los tubos.

Espejos: El haz de tubos remata sus extremos en placas perforadas llamadas espejos, que sirven por una parte como elementos divisores entre el flujo del lado coraza y el flujo del lado tubos y por otra parte como elementos de sujeción de los tubos; estos cruzan el espejo a través de sus perforaciones y sellan expansionados contra los espejos o mediante una soldadura perimetral en los extremos de los tubos para unirlos a los espejos permanentemente.

Cabezal de distribución: Elemento similar a la coraza, cuya función es recibir el fluido que ha de circular por el interior de los tubos, distribuirlo y recolectarlo para mandarlo fuera de él.

Cabezal Flotante: Está constituido por una tapa que se fija al espejo flotante por medio de pernos y un anillo dividido, teniendo como función retornar el fluido que circula por el interior de los tubos hacia el cabezal de distribución o bien mandar el fluido fuera del cambiador cuando este cuenta con un solo paso lado tubos.

A continuación se muestran algunos intercambiadores de calor donde se especifica la norma exacta que se utiliza:

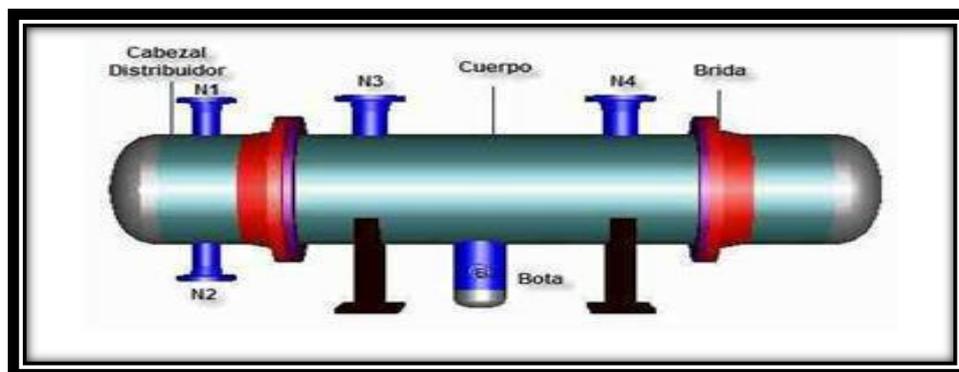


Figura 2.56 Intercambiador de calor según las Normas Tema.

- ASME Sección VIII División 1 (parte UHX, formalmente App. AA)
- Norma TEMA
- PD 5500 (formalmente BS5500, norma Británica)

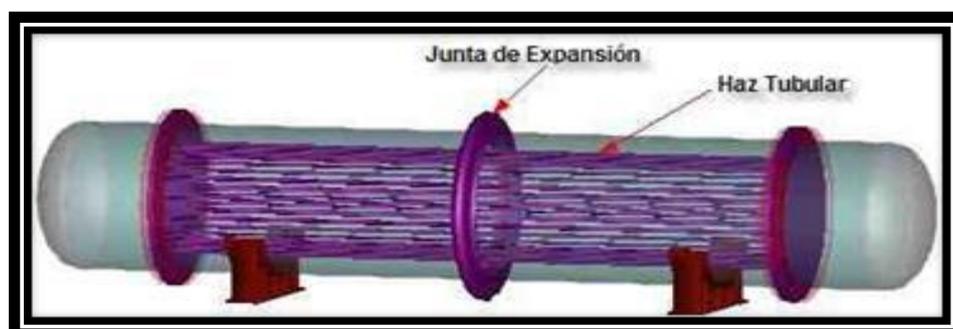


Figura 2.57 Intercambiador de calor de placas tubulares fijas (Normas Tema)

- Las Placas Tubulares fijas pueden ser diseñadas por normativa ASME, PD5500 y TEMA.
- Las juntas de expansión pueden ser diseñadas por TEMA y ASME

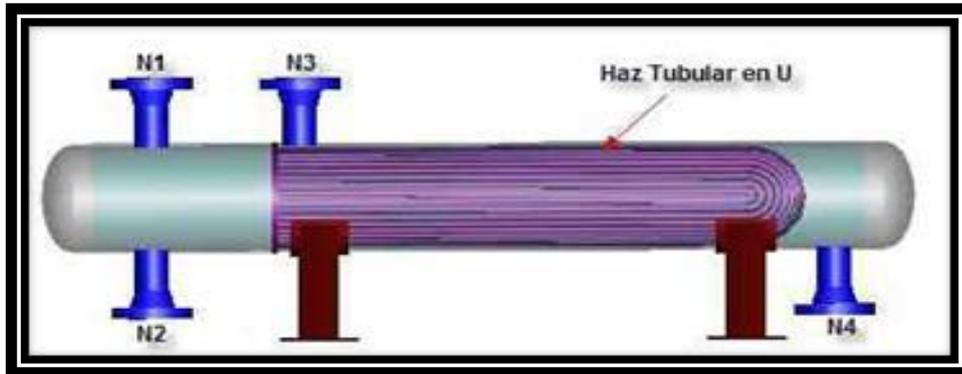


Figura 2.58 Intercambiador de calor de placas tubulares y tubos U

- Los intercambiadores de calor con tubos en U pueden ser diseñados por normas ASME, PD5500 y TEMA.

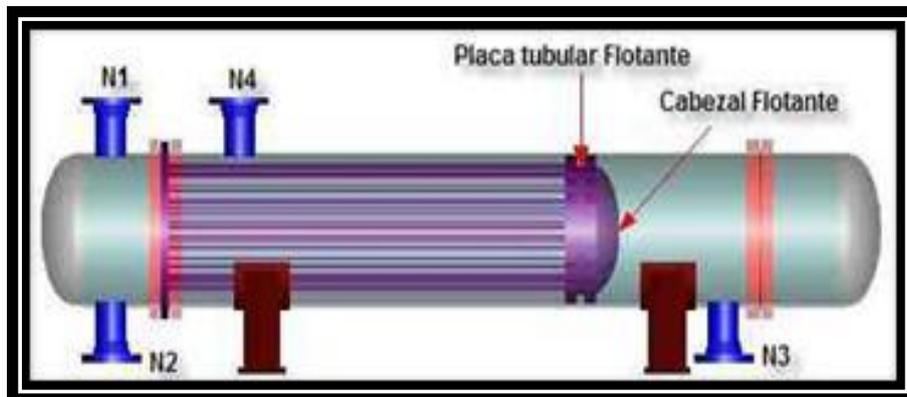


Figura 2.59 Intercambiador de calor de placa tubular flotante

- Los intercambiadores de calor con cabezal flotante pueden ser diseñados por normas ASME, PD5500 y TEMA.
- La cubierta del cabezal flotante puede ser diseñada por normas ASME y PD5500.

Fuente: <http://www.scribd.com/doc/17091619/disenio-y-calculo-de-intercambiadores-de-calor>

Fuente: http://www.software-gg.com/pv_intercambiadores.htm, Normas tema

2.3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA INSTALACIÓN

Para la instalación general del banco de pruebas se sigue un gran número de requerimientos y normas para su perfecto funcionamiento. Los intercambiadores de calor han sido tratados y dados su mantenimiento respectivo para tener un óptimo rendimiento, han sido expuestos a pruebas hidrostáticas para determinar fugas y posteriormente se utiliza procesos de soldadura como el TIG (TungstenInert Gas – Gas inerte de tungsteno) para corregir y estar seguro que los intercambiadores trabajen correctamente.

Para la construcción de la estructura del banco se ha utilizado tubos cuadrados de acero inoxidable reforzado de una pulgada con un espesor de hasta 1.5 mm, se ha utilizado soldadura de arco eléctrico para unir los diversos tubos cuadrados que conforman la estructura y ha sido debidamente calculada para que esta resista pesos de todos los sistemas que actúan en el banco de pruebas.

Para los sistemas anexos de refrigeración y calentamiento se han realizado pruebas de fugas con nitrógeno para garantizar su óptimo funcionamiento, se han seguido correctos procedimientos de instalación para garantizar el máximo rendimiento de los mismos

2.3.3 EQUIPOS PRELIMINARES

El banco de pruebas para intercambiadores de calor tipo tubo concéntrico y multitubo para flujo paralelo y contraflujo utilizando como fluidos de trabajo aceites api y agua consta de los siguientes equipos preliminares:

2.3.3.1 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son equipos diseñados y construidos para efectuar una transferencia de calor entre dos fluidos. En el trabajo de investigación existen dos tipos de intercambiadores de calor:



Figura 2.60 Intercambiador de calor de tubo y coraza concéntrico (Agua-Aceite)

Este intercambiador de calor cuenta con un solo tubo concéntrico de 34.5 mm de diámetro y 410 mm de longitud el cual está ubicado internamente en la coraza de 115 mm de diámetro que consta con dos tapas montables y un aislamiento o sellante térmico.

Intercambiador de calor de tubo y coraza multitubo (Agua-Aceite)

Este intercambiador de calor cuenta con 4 tubos en arreglo cuadrado de 656 mm de longitud dentro de una coraza de 124.5 mm y dos tapas fijas a los extremos, cada tubo tiene un diámetro de 18 mm.



Figura 2.61 Intercambiador de calor de tubo y coraza multitubo (Agua-Aceite)

2.3.3.2 Sistema de calentamiento

Para los intercambiadores de calor se ha utilizado el sistema de calentamiento por resistencia eléctrica. El cual consta de las siguientes partes:

Tanque de almacenamiento de aceite:



Figura 2.62 Tanque de almacenamiento de aceite

Dicho tanque tiene una capacidad de almacenamiento de 17 galones. Y consta de dos embaces cúbicos de diferentes dimensiones ubicados uno encima de otro, con lo que se generó un espacio para lograr ubicar un aislante térmico necesario para conservar la temperatura del fluido en el interior.

Resistencia Eléctrica:

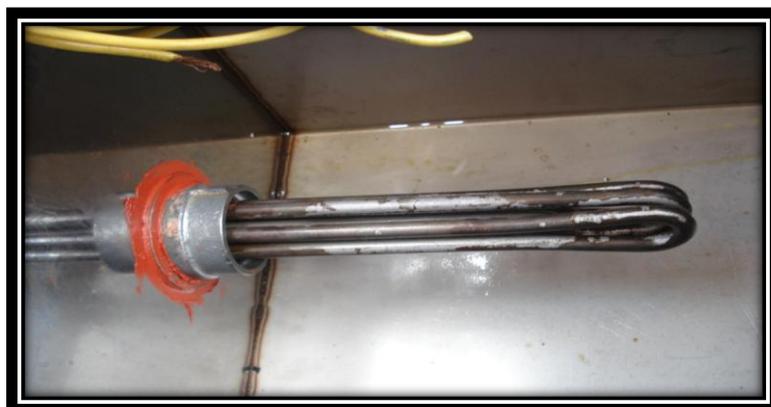


Figura 2.63 Resistencia eléctrica utilizada para calentar el aceite

La resistencia eléctrica tiene un consumo de 1.5Kw/h y logra calentar el fluido de trabajo (aceite) de un rango de 22°C hasta 60°C.

Bomba de aceite:

La bomba ocupada para la recirculación del aceite en el banco de pruebas tiene una potencia de ¾ HP y genera un caudal de hasta 45 litros/min logrando así el caudal requerido para el intercambio de calor en los equipos utilizados.



Figura 2.64 Bomba utilizada para transportar el aceite

2.3.3.3 Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración utiliza dos unidades de refrigeración de iguales características para lograr así el óptimo enfriamiento del fluido de trabajo (Agua) para la operación en los equipos. A continuación se muestra los equipos y partes que conforman el sistema de refrigeración:



Figura 2.65 Unidad de refrigeración

La unidad de refrigeración cuenta con las siguientes partes:

- Compresor hermético
- Condensador de marcha
- Tanque de almacenamiento de refrigerante
- Condensador
- Caja de conexión

Tanque de almacenamiento de agua y evaporador:



Figura 2.66 Evaporador y tanque de almacenamiento de agua

El evaporador cuenta con dos serpentines de cobre distribuidos de tal manera que se logre un enfriamiento de agua en el menor tiempo posible. Así mismo el tanque de almacenamiento de agua tiene una capacidad de 30 galones. El evaporador es capaz de enfriar en menos de treinta minutos el agua de una temperatura ambiente de 24°C a una temperatura de 2°C.



Figura 2.67 Bomba para distribuir agua

La bomba ocupada para la recirculación del agua en el banco de pruebas tiene una potencia de 1 HP y genera un caudal de hasta 110 litros/min, logrando así el caudal requerido para el intercambio de calor en los equipos utilizados.

2.3.3.4 Instrumentación y control

En el caso de la instrumentación se han utilizado equipos con el mayor grado de apreciación y mínimo porcentaje de error necesarios para llevar un control preciso en el banco de pruebas. Estos son:

Control digital de temperatura para el fluido frío (agua)



Figura 2.68 Control digital de temperatura para agua

El control digital para refrigeración y deshielo (TC-900Ri Power) es un controlador de temperatura para congelados que automatiza los procesos de deshielo de acuerdo con las necesidades de la instalación, proporcionando gran economía de energía. Estos equipos se usan generalmente en cámaras y expositores frigoríficos.

Especificaciones técnicas:

Tabla 2.6 Especificaciones técnicas del control digital (TC-900Ri Power)

ALIMENTACION:	TC-900Ri power: 90 – 264 Vac±10%(50/60Hz)
TEMPERATURA DE CONTROL:	-50 hasta 75°C / -58 hasta 167°F
TEMPERATURA DE OPERACIÓN:	-10°C hasta 50°C / 32 hasta 122°F
HUMEDAD DE OPERACIÓN:	10 hasta 90% HR (sin condensación)
RESOLUCION:	0.1°C entre -10 y 75°C y 1°C entre -50 y -10°C
SENSORES:	S1: Sensor de ambiente (negro)
	S2: Sensor preso al evaporador (gris)

Control digital de temperatura para el fluido caliente (aceite)



Figura 2.69 Control digital de temperatura para aceite

El equipo MT-516CVT es un controlador que indica la temperatura del aceite, pudiendo ser configurado para refrigeración y calefacción. Posee un temporizador (timer) cíclico y un monitor de tensión los cuales regulan y controlan la temperatura deseada del fluido a utilizar. Se aplica en tanques de enfriamientos, cámaras y refrigeradores comerciales y bombas de calor.

Especificaciones técnicas:

Tabla 2.7 Especificaciones técnicas del control digital MT-516CVT

ALIMENTACIÓN:	240 Vac ± 25% (50/60Hz)
TEMPERATURA DE CONTROL:	-50 hasta 75°C / -58 hasta 167°F
TEMPERATURA DE OPERACIÓN:	-10°C hasta 50°C / 32 hasta 122°F
HUMEDAD DE OPERACIÓN:	10 hasta 90% HR (sin condensación)
RESOLUCIÓN:	0.1°C entre -10 y 75°C y 1°C entre -50 y -10°C
DIMENSIONES:	71x28x71 mm
SENSORES:	S1: Sensor de ambiente (negro) S2: Sensor preso al evaporador (gris)

Contador de control

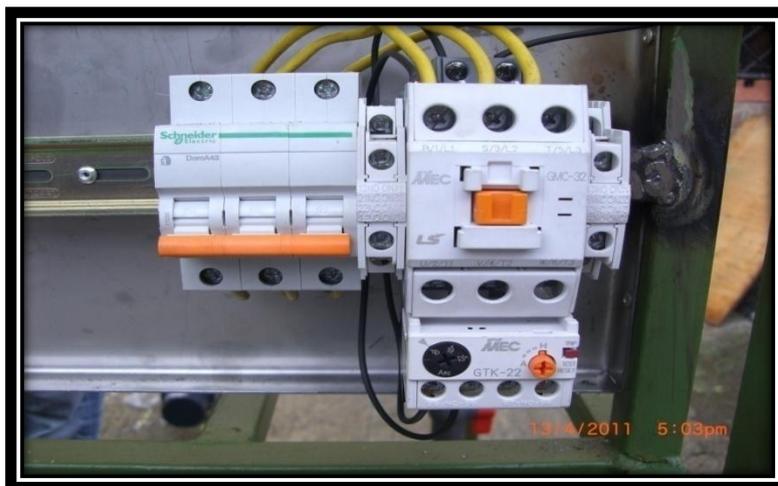


Figura 2.70 Contactores

Los contactores son dispositivos que tienen la capacidad de cortar la corriente eléctrica de un receptor o instalación con la posibilidad de ser accionados a distancia. Constan de las siguientes partes:

- Breaker Trifásico
- Relé de protección térmica
- Contactor principal



Figura 2.71 Caja de breaker

La caja de breaker se ha instalado con la función de alimentar de energía eléctrica a todos los sistemas del banco de pruebas, controlando así las posibles variaciones de voltaje que se generen.

2.4 MÉTODO COMPUTACIONAL MEDIANTE ANSYS



2.4.1 INTRODUCCIÓN

Se ha utilizado el programa ANSYS para lograr simular el comportamiento del banco de pruebas, se analizó el comportamiento de los fluidos y materiales que interactúan entre sí como también se observó los fenómenos físicos que rigen el proyecto. A continuación se aplica brevemente cuales son los subprogramas que fueron utilizados en el ANSYS, cual es uso y en base a que método numérico logran simular los fluidos en los intercambiadores de calor.

2.4.2 CFX

El ANSYS CFX es un software utilizado para el desarrollo dinámico con el fin de resolver problemas de fluidos, este programa de alto rendimiento utiliza tecnología avanzada para que sus resultados sean fiables y precisos de una manera rápida y compresible. Se encarga de resolver los problemas de modelos físicos para lograr representar los fenómenos relacionados con el flujo de los fluidos.

Con el paso de tiempo el ANSYS se ha ido completando mediante sus subprogramas como el fluent, ice pack, polyflow, turbogrid, entre otros. También por medio del workbench se ha proporcionado una conexión bidireccional a la mayoría de programas CAD (Computer aided design – diseño asistido por computadora).

2.4.2.1 Introducción al CFD

El CFD (Computational fluid dynamics – dinámica de fluidos computacionales) es la ciencia que predice el flujo del fluido, el calor y la transferencia de masa, así como

reacciones químicas y fenómenos relacionados, resolviéndolos por métodos numéricos y ecuaciones matemáticas que se han ido actualizando y rediseñando con el fin de reducir costos en la experimentación.

2.4.2.2 Ecuaciones que gobiernan los fenómenos para la simulación

El conjunto de ecuaciones por el cual el programa ANSYS logra realizar la simulación de los fluidos son las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma de conservación. Existen varias ecuaciones mediante el cual el programa ANSYS opera y logre simular los fluidos estas son:

- Las ecuaciones de transporte
- Las ecuaciones de estado
- Las ecuaciones conjugadas de transferencia de calor

Gracias al programa ANSYS y sus respectivos archivos helps (ayuda) se ha logrado investigar cada una de las ecuaciones que rigen los diferentes fenómenos en los fluidos que serán descritas a continuación.

2.4.2.2.1 Ecuaciones de transporte

En esta sección se presentan: las ecuaciones instantáneas de masa, de momento y la de conservación de la energía. En los flujos turbulentos las ecuaciones instantáneas de masa son un promedio que lleva a otros términos adicionales en este caso el programa ANSYS los analiza en función de la turbulencia y de la teoría de función de muro. Las ecuaciones de conservación de la energía, de momento y la instantánea de masa se pueden escribir de la siguiente manera:

Ecuación de la continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

Ec: 2.58

donde: ρ es la densidad, t el tiempo y U la velocidad del fluido. Se observa que esta ecuación forma parte de las tres ecuaciones de EULER para fluidos.

Ecuación de Momento:

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad \text{Ec: 2.59}$$

cuando se relaciona el tensor de tensiones con la velocidad de deformación se tiene que:

$$\tau = \mu \left(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U \right) \quad \text{Ec: 2.60}$$

Ecuación total de energía:

Una forma alternativa de la ecuación de la energía, que es conveniente para los flujos de baja velocidad, también está disponible. Para una derivación del mismo, es necesaria una ecuación para la energía mecánica:

$$K = \frac{1}{2} U^2 \quad \text{Ec: 2.61}$$

La ecuación de la energía mecánica se obtiene tomando el producto escalar de la ecuación de momento:

$$\frac{\partial (\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U K) = -U \cdot \nabla p + U \cdot (\nabla \cdot \tau) + U \cdot S_M \quad \text{Ec: 2.62}$$

Sustrayendo esta ecuación de la ecuación de la energía total se obtiene la ecuación de la energía térmica:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \mathbf{U} \cdot \nabla p + \tau : \nabla \mathbf{U} + S_E$$

Ec: 2.63

donde el término $\tau : \nabla \mathbf{U}$ es siempre positivo y se llama la disipación viscosa.

Con las hipótesis con más detalle, se logra obtener la ecuación de la energía térmica:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \tau : \nabla \mathbf{U} + S_E$$

Ec: 2.64

2.4.2.2.2 Ecuaciones de estado

Son ecuaciones constitutivas para sistemas hidrostáticos que describe el estado de agregación de la materia como una relación matemática entre la temperatura, la presión, el volumen, la densidad, la energía interna y posiblemente otras funciones de estado asociadas con la materia.

Las ecuaciones de transporte descritas anteriormente deben ser aumentadas con las ecuaciones constitutivas de estado para la densidad y entalpía, con el objetivo de formar un sistema cerrado. En el caso más general, estas ecuaciones de estado tienen la forma:

$$\rho = \rho(p, T)$$

Ec: 2.65

$$dh = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T dp = c_p dT + \left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T dp$$

Ec: 2.66

$$c_p = c_p(p, T)$$

Ec: 2.67

Ecuaciones de estado incomprensible:

Este es el caso más simple, la densidad es constante y C_p puede estar en función de la temperatura.

$$\rho = \frac{W P_{abs}}{R_0 T} \quad \text{Ec: 2.68}$$

$$dh = c_p dT \quad \text{Ec: 2.69}$$

$$c_p = c_p(T) \quad \text{Ec: 2.70}$$

Ecuación General de Estado:

$$\rho = \rho(p, T) \quad \text{Ec: 2.71}$$

$$c_p = c_p(p, T) \quad \text{Ec: 2.72}$$

Señalando que:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial p} \right|_T = v - T \left. \frac{\partial v}{\partial T} \right|_p \quad \text{Ec: 2.73}$$

donde $v = \frac{1}{\rho}$

Por lo tanto la ecuación de estado para entalpia queda de la siguiente manera:

$$dh = c_p dT + \left[v - T \left. \frac{\partial v}{\partial T} \right|_p \right] dp \quad \text{Ec: 2.74}$$

2.4.2.2.3 Ecuaciones conjugadas de transferencia de calor

El programa CFX permite crear regiones solidas en las soluciones de ecuaciones de transferencia de calor, pero sin flujo. Esto se conoce como transferencia conjugada de calor y las regiones solidas se las conoce como dominios sólidos.

Dentro de los dominios sólidos, la ecuación de la conservación de la energía puede representar para el transporte de calor debido al movimiento del sólido, de la conducción y de las fuentes de calor volumétricas.

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}_s h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad \boxed{\text{Ec: 2.75}}$$

Donde h , ρ y λ son la entalpía, la densidad y la conductividad térmica del sólido respectivamente, \mathbf{U}_s es la velocidad del sólido. Si se especifica y S_E es una fuente opcional de calor volumétrico. El término de advección de movimiento de sólido (incluyendo el término \mathbf{U}_s) es opcional y solo se agrega cuando se establece una velocidad de movimiento del sólido.

CAPÍTULO 3

INGENIERÍA BÁSICA

3.1 INGENIERÍA BÁSICA MECÁNICA

3.1.1 CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DEL BANCO

En el diseño y construcción de la estructura del banco de pruebas para I.C. se ha realizado un análisis de elementos y materiales utilizando el programa de cálculo estructural SAP2000, esto con el fin de comprobar que la estructura va a soportar las cargas de los equipos utilizados y así poder construir una estructura acorde a los requerimientos estimados.

Como proceso preliminar se calculó el peso de cada elemento que conforma el banco de pruebas para intercambiadores de calor. A continuación se indica una tabla de todos los elementos y pesos utilizados en el banco de pruebas.

Tabla 3.1 Pesos y elementos que contiene el banco de pruebas

ELEMENTO	PESO Kg.
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN (1)	32
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN (2)	32
TANQUE DE AGUA	19
TANQUE AGUA EXTERIOR	35
TANQUE ACEITE	21
TANQUE ACEITE EXTERIOR	20
INTERCAMBIADORES DE CALOR	17
INSTRUMENTACION	9
EVAPORADORES	4
BOMBA DE AGUA	10
BOMBA DE ACEITE	5
RESISTENCIA	1
TUBERIA	9
TABLERO	11
<u>TOTAL</u>	225

Como se observa en la tabla anterior los pesos de cada elemento que conforman los elementos del intercambiador de calor se denomina carga muerta, porque es considerada carga inerte y forma parte del peso de la estructura.

Los fluidos de trabajo, tanto el agua como el aceite son consideradas cargas vivas ya que son cargas que no van a estar permanentemente en la estructura, van a estar en recirculación y no estarán presentes en casos como de mantenimiento del equipo.

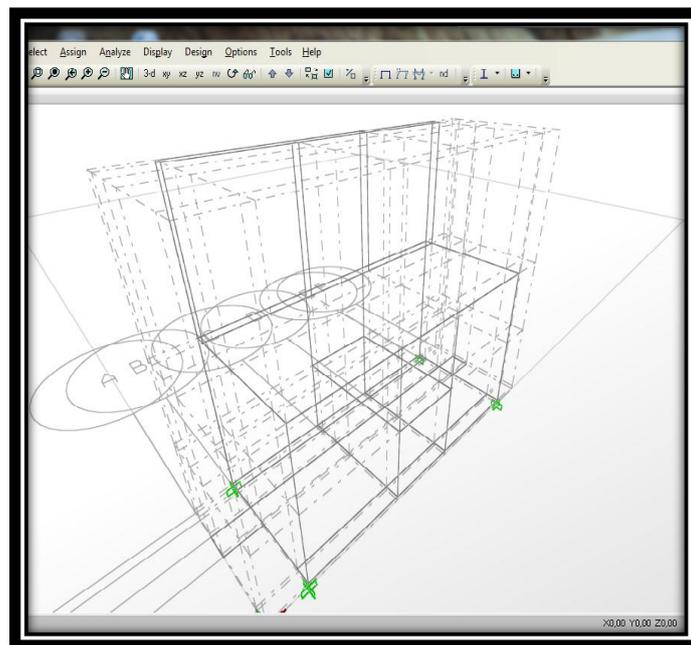


Figura 3.1 Gráfica de la estructura dibujada en SAP2000

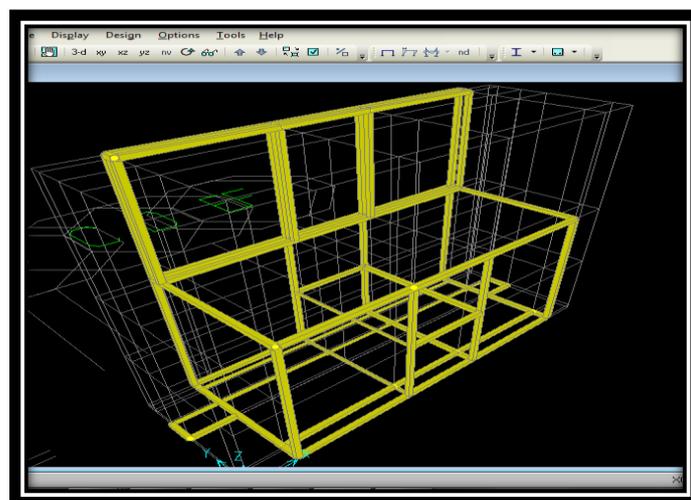


Figura 3.2 Gráfica de la estructura extruida en el programa SAP2000

Luego de dibujado la estructura en el programa se procedió a asignar las cargas vivas y muertas respectivamente:

A continuación se muestra la siguiente tabla donde se indica las cargas vivas del banco de pruebas para intercambiadores de calor:

Tabla 3.2 Pesos del agua y del aceite

Carga Viva	
ELEMENTO	PESO Kg.
AGUA	160
ACEITE	70
TOTAL CARGA VIVA	230

Una vez determinadas las cargas que actúan en cada parte de la estructura se procede a dibujarla y calcularla en el programa.

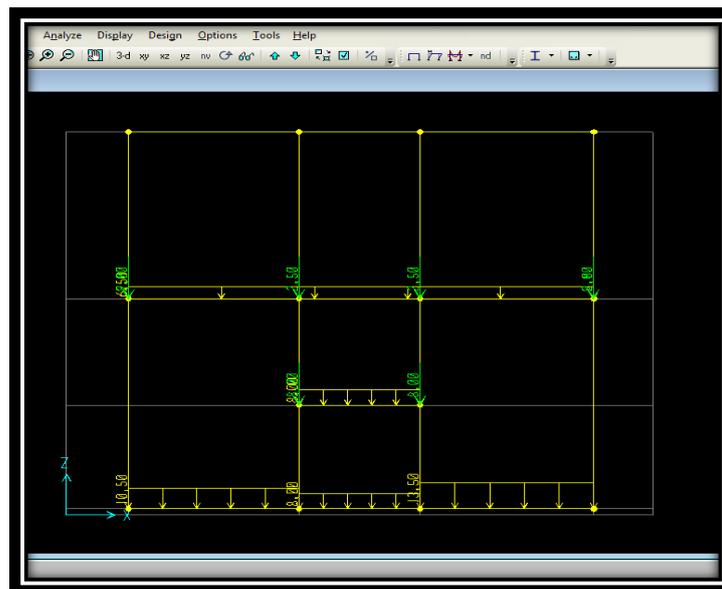


Figura 3.3 Asignación de cargas a la estructura

Una vez establecidas las cargas vivas se procedió a realizar el cálculo de la estructura corriendo el programa obteniendo los siguientes resultados:

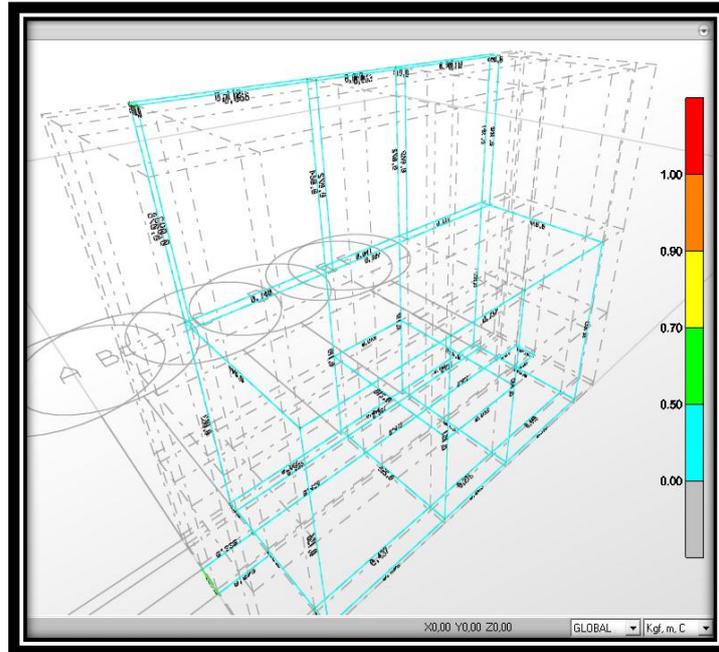


Figura 3.4 Gráfica de resultados de la estructura después de haber calculado todas las cargas.

Como se observa en el gráfico todos los elementos de la estructura se encuentran en la zona de 0 a 0.5 que indica que el valor de esfuerzo versus deformación están en el rango correcto y que la estructura no va a fallar.

Una vez finalizado el análisis se procedió a construir la estructura para el banco de pruebas.



Figura 3.5 Estructura del banco de pruebas vista isométrica frontal



Figura 3.6 Estructura del banco de pruebas vista isométrica posterior

3.1.2 DISEÑO DE RED DE FLUJO DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO

Para el diseño de la red de flujo de los intercambiadores de calor se ha creado y utilizado el siguiente esquema mostrado en la figura.

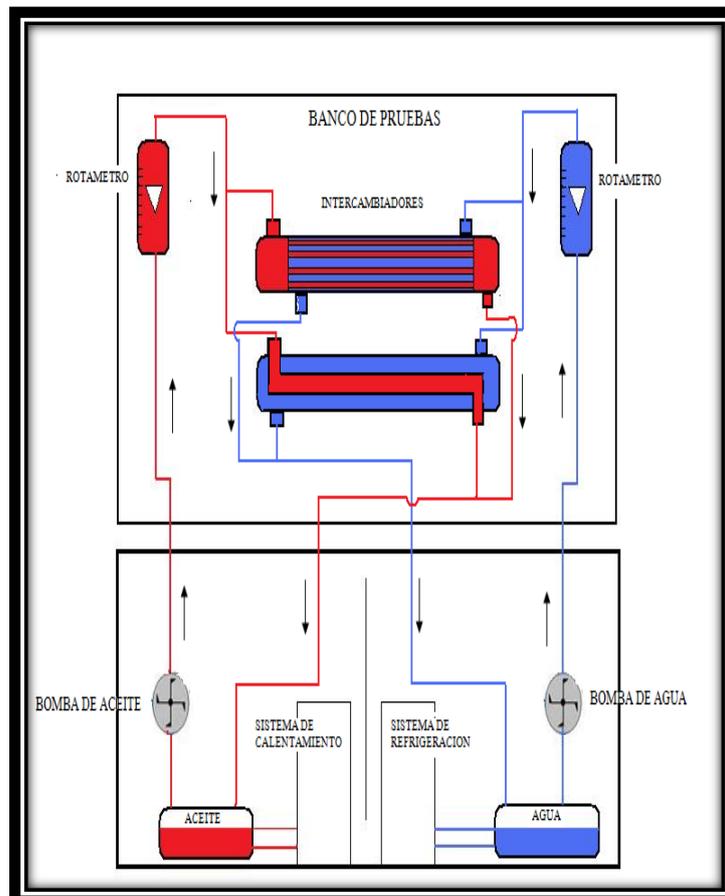


Figura 3.7 Esquema básico del intercambiador de calor

Se puede notar que el fluido frío (color azul) sale del sistema de refrigeración y entra a los dos intercambiadores de calor, se realiza la transferencia de calor y por medio de tuberías regresa de nuevo al tanque de almacenamiento de agua. Lo mismo sucede con el fluido caliente (color rojo). Cada red de flujo cuenta con una bomba para la recirculación de los fluidos, tanto para el agua como para el aceite. Posteriormente se utilizaron válvulas de globo para elegir que intercambiador va a ser activado y que intercambiador va a estar en descanso, todo esto con el objetivo de poder utilizar cualquier intercambiador durante el proceso de toma de datos.

No es necesario realizar cálculos en pérdidas de las tuberías ya que las bombas cuentan con la suficiente potencia para los caudales requeridos.

3.2 INGENIERÍA BÁSICA TÉRMICA

3.2.1 DISEÑO, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL I.C. TUBO CORAZA

Para diseñar un intercambiador de calor es necesario primero entender los fenómenos que ocurrirán en cada etapa del equipo, tener claro los procesos de transferencia de calor a los que serán sometidos los fluidos de trabajo para luego optimizar el diseño del intercambiador de calor mediante pasos bien detallados según sean nuestros requerimientos.

3.2.1.1 Análisis de conducción para el diseño de un intercambiador de calor.

Flujo de calor a través de una pared de un tubo.

Se iniciará estudiando cómo interviene el proceso de transferencia de calor por conducción en nuestros intercambiadores de calor para después analizar el comportamiento del flujo de calor a través de una pared de un tubo ya que nuestros intercambiadores de calor son de tipo tubo y coraza.

El flujo del calor a través de una pared de un tubo es diferente al flujo en la pared plana, mientras en la pared plana el área de transferencia permanece constante en toda la trayectoria en una pared de un tubo el área de transferencia de calor aumenta con la distancia de la trayectoria de r_1 a r_2 .

El área de transferencia a cualquier radio viene dado por la formula $2\pi rL$ y como el calor fluye hacia a fuera del cilindro nos queda un gradiente de temperatura con respecto a la longitud (dt/dr). La ecuación de Fourier para pared de un tubo es la siguiente:

$$q = 2\pi r k \left(-\frac{dt}{dr} \right) \quad \boxed{\text{EC: 3.1}}$$

donde se observa que la fórmula es equivalente a la muy conocida formula de Fourier para transferencia de calor por convección:

$$q = -KA \cdot \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad \boxed{\text{EC: 3.2}}$$

donde A es el área en este caso $2\pi r$ que se multiplica por un diferencial de temperatura sobre un diferencial de distancia (diferencial de radio en el caso de conducción en los tubos)

3.2.1.2 Análisis de convección para el diseño de un intercambiador de calor.

El proceso de transferencia de calor por convección en el intercambiador de calor es uno de los fenómenos más estudiados para el correcto diseño térmico del mismo. La transferencia de calor por convección se debe al movimiento de los fluidos que actúan en el interior del intercambiador de calor. En los intercambiadores de calor se presenta generalmente la convección tipo forzada que obliga al fluido a circular mediante medios mecánicos como puede ser mediante un ventilador o una bomba caso contrario ocurre en la convección natural donde el movimiento del fluido es debido a causas naturales.

La convección forzada se la analiza dependiendo de los dos tipos de flujo que existen: el interno y el externo. En los intercambiadores de calor tenemos estos dos tipos de flujo ya que hay intercambiadores de calor que usan varios tubos internos donde se va a hacer llegar el fluido así como también habrá fluidos que fluyan por

los exteriores de los tubos con la función principal de establecer el proceso de convección.

Teniendo en consideración que dentro de un tubo va a circular un fluido con una velocidad V y una temperatura T^∞ sobre una superficie de Área A_s y de temperatura T_s , al ser T_s diferente que T^∞ habrá una transferencia de calor por convección donde se tiene que:

$$q'' = h(T_s - T^\infty) \quad \boxed{\text{EC: 3.3}}$$

Como las condiciones de flujo van a variar de punto a punto durante toda la superficie de contacto es necesario integrar el flujo local que actúa sobre toda la superficie se obtiene que:

$$q = \int_{A_s} q'' \cdot dA_s \quad \boxed{\text{EC: 3.4}}$$

Integrando se obtiene:

$$q = (T_s - T^\infty) \int_{A_s} h \cdot dA_s \quad \boxed{\text{EC: 3.5}}$$

Al resolver y definir un coeficiente de convección promedio para toda la superficie de contacto y estableciendo un área para superficies cilíndricas que es $2\pi rl$ la ecuación final para el cálculo de convección en un tubo resulta:

$$q = 2\pi rl * h * (T_s - T^\infty) \quad \boxed{\text{EC: 3.6}}$$

Se conoce que la transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie de contacto y del tipo de flujo. Entre las principales propiedades del fluido se encuentran:

- la viscosidad dinámica μ
- la conductividad térmica k
- la densidad ρ

Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la geometría y la aspereza. El tipo de flujo es muy fundamental ya que se debe calcular si va a ser flujo laminar o turbulento para el correcto uso de las fórmulas en el diseño a realizarse.

Una vez tomados en cuenta todos los parámetros y fenómenos que rigen la transferencia de calor en los intercambiadores de calor se procede a realizar los cálculos que se muestran a continuación los cuales están explicados con cada paso y fórmula utilizada.

3.2.1.3 Cálculo de temperaturas de salida

Tubo concéntrico Análisis contraflujo

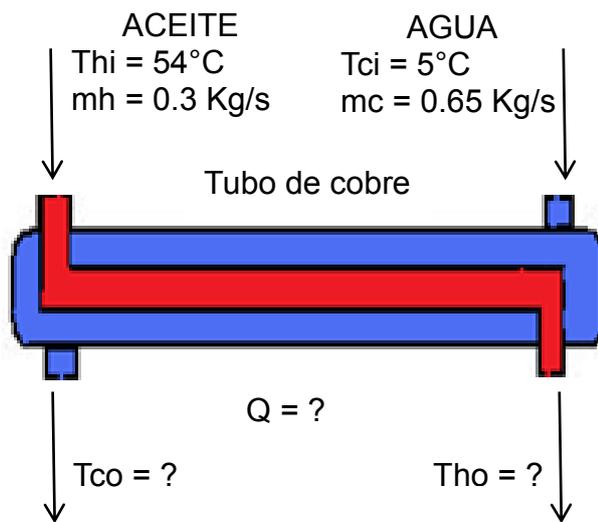


Figura 3.8 Gráfica y esquema del I.C concéntrico contraflujo

Paso 1.- Análisis del material donde se fijará el área de transferencia de calor para conocer su constante de conductividad térmica.

Cobre

$$K_{cu} = 401 \left(\frac{w}{m^{\circ}C} \right)$$

pág. 829 incropera cuarta edición

Paso 2.- Conocer la dimensiones del intercambiador diámetro de coraza, diámetro de tubos interiores y su longitud, de ser el caso las dimensiones de los deflectores y número de pasos.

$$\begin{aligned}d_o &= 0.0345 \text{ m} & r_o &= \frac{d_o}{2} \\d_i &= 0.0315 \text{ m} & r_i &= \frac{d_i}{2} \\D_e &= 0.1484 \text{ m} & L_e &= 0.41 \text{ m}\end{aligned}$$

Paso 3.- Definir el área de transferencia de calor

$$\begin{aligned}\text{Área} &= d_o \cdot \pi \cdot L_e \\ \text{Área} &= 0.044 \text{ m}^2 \\ A_o &= \text{área}\end{aligned}$$

Definiciones varias

El calor específico.- es la cantidad de calor que hay que suministrar a una masa para elevar su temperatura.

Densidad.- es la cantidad de masa contenida en un volumen.

Viscosidad.- es la oposición de fluido a las deformaciones tangenciales.

Conductividad térmica.- es una propiedad física de los materiales para medir la capacidad de conducción de calor.

Número Prandtl.- es un número adimensional proporcional al cociente de la difusividad del momento o movimiento con la difusividad térmica.

Paso4.- Mediante tablas tabuladas, obtención de datos de propiedades térmicas de los fluidos de trabajo a temperatura media.

Datos:

Fluido Frío
Agua

Fluido Caliente
Aceite

Calor Específico

$$C_{pc} = 4198 \text{ (J/Kg}^\circ\text{K)}$$

$$C_{ph} = 2500 \text{ (J/Kg}^\circ\text{K)}$$

Densidad

$$\rho_c = 999.8 (\text{Kg}/\text{m}^3)$$

$$\rho_h = 884 (\text{Kg}/\text{m}^3)$$

Viscosidad

$$\mu_c = 1.452 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$\mu_h = 1.2 \text{ Pa.s}$$

Conductividad Térmica

$$k_c = 0.58 (\text{w}/\text{m}.\text{°K})$$

$$k_h = 1.41 (\text{w}/\text{m}.\text{°K})$$

Prandtl

$$Pr_c = 12.22$$

$$Pr_h = 2012$$

Paso 5.- Imposición de temperatura que requiere el cálculo del intercambiador y del flujo másico necesario para ingresar a los intercambiadores de calor

Temperaturas de entrada y flujo másico

$$T_{ci} = 5 \text{ °C}$$

$$T_{hi} = 54 \text{ °C}$$

$$m_c = 0.65 (\text{Kg}/\text{s})$$

$$m_h = 0.3 (\text{kg}/\text{s})$$

Paso 6.- El cálculo del coeficiente de convección para el cual es necesario en número de Reynolds, Prandtl, el número de Nusselt

Diámetro hidráulico

En los intercambiadores de calor tubo y coraza el diámetro hidráulico representa a la sección de un tubo no circular, en este caso se da restando del diámetro de la coraza todos los diámetros de los tubos que se encuentren en su interior para de esta manera facilitar el estudio de este como si fuera una tubería con sección circular.

$$D_h = D_e - d_o$$

$$D_h = 0.114$$

Incropera pág. 595

Número de Reynolds

Es un número adimensional para caracterizar el comportamiento de un fluido haciendo relaciones entre la velocidad, viscosidad, densidad y su flujo másico que determina si el fluido es laminar, turbulento o en transición para saber cómo tratarlo para el desarrollo de su análisis.

$$Re_o = \left(\frac{4.m_c}{\pi.(D_e + d_i).\mu_c} \right)$$

$$Re_i = \left(\frac{4.m_h}{\pi.d_i.\mu_h} \right)$$

$$Re_o = 3.182 \times 10^3$$

$$Re_i = 10.3$$

Flujo turbulento

Flujo laminar

Factor de fricción

Es un parámetro adimensional para incluir los valores de pérdidas de carga en la tubería y se encuentra relacionada directamente con el número de Reynolds y de la rugosidad relativa además para facilitar la búsqueda de este parámetro se puede usar el diagrama de Moody, existe relaciones para el cálculo de este factor para cuando el flujo es laminar y turbulento.

$$f = (0.790 \ln(Re_o) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 64/Re_i$$

$$f = 0.045$$

$$f = 6.4$$

Incropera pág. 424

Número de Nusselt

Es un número adimensional que representa la transmisión de calor por convección de un fluido sobre una superficie, en si representa el gradiente de temperatura adimensional en toda la superficie donde la k_f es conductividad del fluido y h el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$Nu_o = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (Re_o - 1000) * Pr_c}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} * \left(Pr_c^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

Nota: Criterio para flujo turbulento $Re > 3000$ y $Pr > 6$, para flujo laminar $Re < 2000$ y $Pr > 6$, pág. 460 Incropera

$$Nu_o = 107.4$$

$$Nu_i = 4.36$$

Incropera pág. 445

Coefficiente de transferencia de calor h

Cuantifica la influencia de las propiedades del fluido cuando se produce transferencia por convección.

$$h_o = \left(\frac{kc \cdot Nu_o}{Dh} \right)$$

$$h_i = \left(\frac{kh \cdot Nu_i}{d_i} \right)$$

$$h_o = 548.7 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$$

$$h_i = 201.2 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$$

Paso 7.- Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para lo cual se requiere los coeficientes de convección Nu_o - Nu_i , factores de impureza, diámetros interno, y externo del tubo o los tubos interiores y la constante de conductividad térmica del material del tubo o los tubos internos del I.C.

Coefficiente Global de Transferencia de Calor

Este coeficiente es la resistencia total a la transferencia de calor entre dos fluidos por convección y conducción separadas por paredes planas y cilíndricas aplicadas a superficies sin aletas.

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i \cdot h_i} + \frac{r_o \cdot R_{di}}{r_i} + \frac{r_o}{K_{cu}} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + R_{do} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_o = 117.81 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$$

Incropera pág. 586 U_o dentro del rango

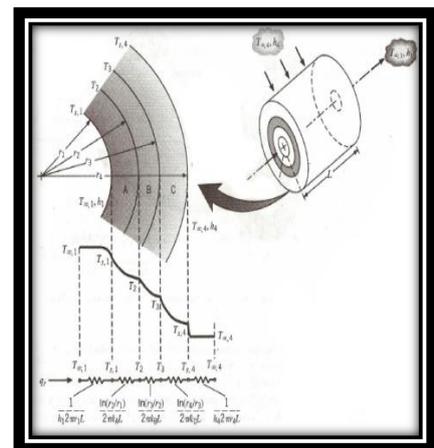


Figura 3.9 Analogía eléctrica

Paso 8.- Después de los cálculos del coeficiente global de transferencia de calor se tiene los suficientes datos para generar iteraciones en las ecuaciones de flujo de calor.

Ecuaciones flujo de calor

$$1.- qh = mh \cdot Cph(Thi - Tho)$$

$$2.- qc = mc \cdot Cpc(Tco - Tci)$$

$$3.- Qt = Uo \cdot Ao \cdot DMLT$$

$$4.- qc = qh = Qt$$

$$5.- DMLT = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

Resultado de Iteraciones en Math Cad (Ver Anexo L)

$$Tco = 5.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Tho = 53.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

DMLT

Es conocido como la diferencia de temperatura media logarítmica representa un valor de temperatura que sea proporcional a todo el recorrido de los fluidos en intercambio.

Flujo Contracorriente

$$\Delta T1 = Thi - Tco$$

$$\Delta T2 = Tho - Tci$$

$$\Delta T1 = 48.93 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T2 = 48.69 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$DMLT = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

$$DMLT = 48.71 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ecuación General de Intercambiadores de Calor

$$Q1 = Uo \cdot Ao \cdot DMLT$$

$$Q1 = 255.256 \text{ W}$$

Tubo concéntrico análisis flujo paralelo

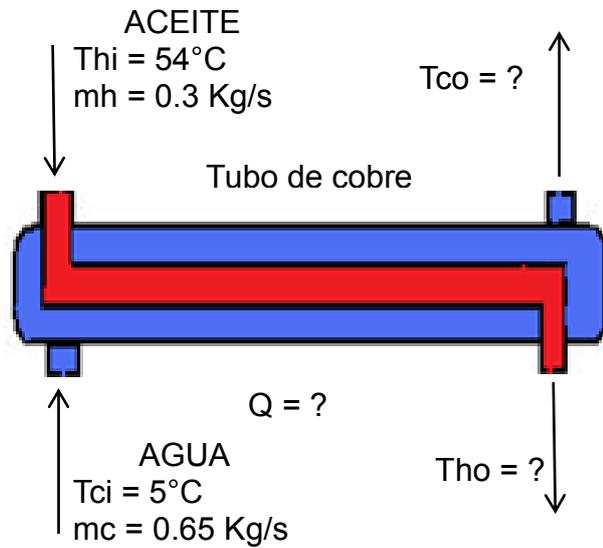


Figura 3.10 Gráfica y esquema del I.C. concéntrico flujo paralelo

Cobre

$K_{cu} = 401 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \right)$ *pág. 829 incropera cuarta edición*

$d_o = 0.0345 \text{ m}$ $r_o = \frac{d_o}{2}$

$d_i = 0.0315 \text{ m}$ $r_i = \frac{d_i}{2}$

$D_e = 0.1484 \text{ m}$

$L_e = 0.41 \text{ m}$

$\text{Área} = d_o \cdot \pi \cdot L_e$

$\text{Área} = 0.044 \text{ m}^2$

$A_o = \text{área}$

Datos:

Fluido Frío (Agua)

Fluido Caliente (Aceite)

Calor Específico

$C_{pc} = 4198 \text{ (J/Kg}^\circ\text{K)}$

$C_{ph} = 2500 \text{ (J/Kg}^\circ\text{K)}$

Densidad

$\rho_c = 999.8 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$

$\rho_h = 884 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$

Viscosidad

$$\mu_c = 1.452 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_h = 1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Conductividad Térmica

$$k_c = 0.58 \text{ (w/m} \cdot \text{°K)}$$

$$k_h = 1.43 \text{ (w/m} \cdot \text{°K)}$$

Prandtl

$$Pr_c = 12.22$$

$$Pr_h = 2012$$

Temperaturas de entrada

$$T_{ci} = 5 \text{ °C}$$

$$T_{hi} = 54 \text{ °C}$$

Flujo Másico

$$m_c = 0.65 \text{ (Kg/s)}$$

$$m_h = 0.3 \text{ (kg/s)}$$

Diámetro hidráulico

$$D_h = D_e - d_o$$

$$D_h = 0.114$$

Incropera pág. 595

Número de Reynolds

$$Re_o = \left(\frac{4 \cdot m_c}{\pi \cdot (D_e + d_i) \cdot \mu_c} \right)$$

$$Re_i = \left(\frac{4 \cdot m_h}{\pi \cdot d_i \cdot \mu_h} \right)$$

$$Re_o = 4.651 \times 10^3$$

$$Re_i = 10.26$$

Flujo turbulento

Flujo laminar

Factor de fricción

$$f = (0.790 \ln(Re_o) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 0.04$$

Incropera pág. 424

Número de Nusselt

$$Nu_o = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (Re_o - 1000) * Pr_c}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} * \left(Pr_c^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

$$Nu_o = 107.381$$

$$Nu_i = 4.36$$

Incropera pág. 445

Coefficiente de transferencia de calor h

$$h_o = \left(\frac{kc * Nu_o}{Dh}\right)$$

$$h_i = \left(\frac{kh * Nu_i}{di}\right)$$

$$h_o = 548.7 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$$

$$h_i = 201.123 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$$

Coefficiente global de transferencia de calor

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i \cdot h_i} + \frac{r_o \cdot R_{di}}{r_i} + \frac{r_o}{K_{cu}} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + R_{do} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_o = 117.881 \text{ (W/m}^2\text{.K)}$$

Incropera pág. 586 U_o dentro del rango

Ecuaciones flujo de calor

$$1.- qh = mh \cdot C_{ph} (Thi - Tho)$$

$$2.- qc = mc \cdot C_{pc} (Tco - Tci)$$

$$3.- Qt = U_o \cdot A_o \cdot DMLT$$

$$4.- qc = qh = Qt$$

$$5.- DMLT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Resultado de Iteraciones

$$Tco = 5.15 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Tho = 53.7 \text{ }^\circ\text{C}$$

DMLT

Flujo Paralelo

$$\Delta T1 = Thi - Tci$$

$$\Delta T2 = Tho - Tco$$

$$\Delta T1 = 48.8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta T2 = 48.619 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$DMLT = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

$$DMLT = 48.8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ecuación general de intercambiadores de calor

$$Q1 = Uo \cdot Ao \cdot DMLT$$

$$Q1 = 254.25 \text{ W}$$

Coraza y Tubos (4) análisis Contraflujo

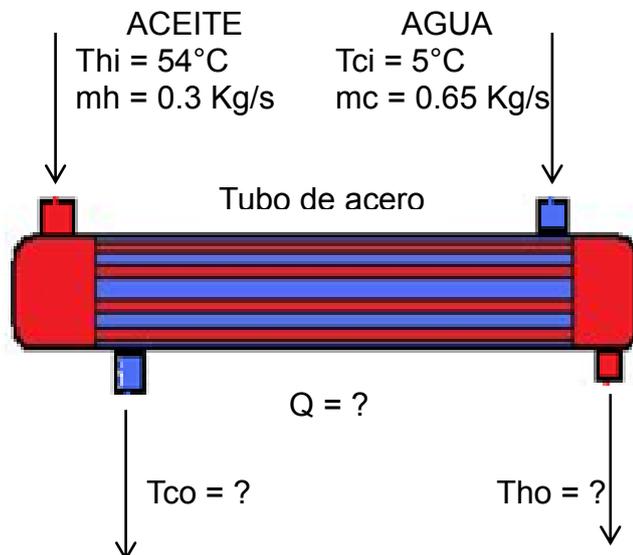


Figura 3.11 Gráfica y esquema del I.C. multitubo contraflujo

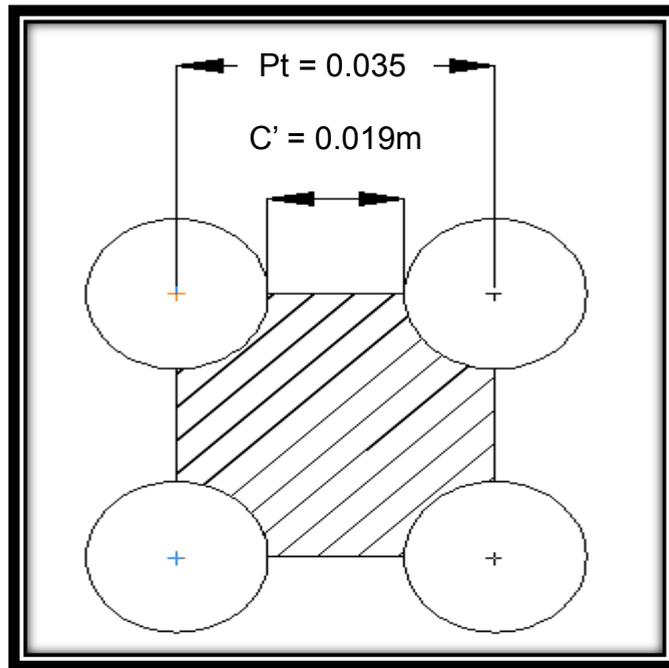


Figura 3.12 Arreglo cuadrado en el I.C. multitubo

Acero

$K_{ace} = 80.2 \left(\frac{w}{m^{\circ}C} \right)$ *pág. 829 incropera cuarta edición*

$do = 0.019 \text{ m}$ $ro = \frac{do}{2}$

$di = 0.017 \text{ m}$ $ri = \frac{di}{2}$

$De = 0.127 \text{ m}$
 $Le = 0.642 \text{ m}$

$\acute{A}rea = 4.do. \pi. Le$

$\acute{A}rea = 0.153 \text{ m}^2$

$Ao = \acute{a}rea$

Datos:

Fluido Frío

Agua

Fluido Caliente

Aceite

Calor Específico

$C_{pc} = 4198 \text{ (J/Kg}^{\circ}\text{K)}$

$C_{ph} = 2500 \text{ (J/Kg}^{\circ}\text{K)}$

Densidad

$\rho_c = 999.8 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$

$\rho_h = 884 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$

Viscosidad

$$\mu_c = 1.452 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\mu_h = 1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Conductividad Térmica

$$k_c = 0.58 \text{ (w/m} \cdot \text{°K)}$$

$$k_h = 1.41 \text{ (w/m} \cdot \text{°K)}$$

Prandtl

$$Pr_c = 12.22$$

$$Pr_h = 2012$$

Temperaturas De Entrada

$$T_{ci} = 5 \text{ °C}$$

$$T_{hi} = 54 \text{ °C}$$

Flujo Másico

$$m_c = 0.65 \text{ (Kg/s)}$$

$$m_h = 0.3 \text{ (kg/s)}$$

$$Pt = 0.035 \text{ m}$$

Diámetro equivalente

Pt es el espacio entre los tubos menos sus radios

$$Deq = 4 \cdot \left(\frac{Pt^2 - \pi \cdot \left(\frac{do^2}{4} \right)}{\pi \cdot do} \right)$$

$$Deq = 0.063$$

Diámetro hidráulico

$$Dh = De - Deq$$

$$Dh = 0.064$$

Incropera pág. 595

Número de Reynolds

$$Re_o = \left(\frac{4 \cdot m_c}{\pi \cdot (De + Deq) \cdot \mu_c} \right)$$

$$Re_i = \left(\frac{m_h}{\pi \cdot di \cdot \mu_h} \right)$$

$$Re_o = 3.062 \times 10^3$$

Flujo turbulento

Factor de fricción

$$f = (0.790 \ln(Re_o) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 0.042$$

Incropera pág. 424

Número de Nusselt

$$Nu_o = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re_o - 1000) \cdot Pr_c}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \cdot \left(Pr_c^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

$$Nu_o = 101.458$$

Incropera pág. 445

$$Nu_i = 4.36$$

Coefficiente de Transferencia de Calor h

$$h_o = \left(\frac{k_c \cdot Nu_o}{D_h}\right)$$

$$h_i = \left(\frac{k_h \cdot Nu_i}{d_i}\right)$$

$$h_o = 920.763 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$$

$$h_i = 355.765 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$$

Coefficiente Global de Transferencia de Calor

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i \cdot h_i} + \frac{r_o \cdot R_{di}}{r_i} + \frac{r_o}{K_{cu}} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + R_{do} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_o = 186.417 \text{ (W/m}^2\cdot\text{K)}$$

Incropera pág. 586 U_o dentro del rango

Ecuaciones flujo de calor

$$1.- qh = mh \cdot Cph (Thi - Tho)$$

$$2.- qc = mc \cdot Cpc (Tco - Tci)$$

$$3.- Qt = Uo \cdot Ao \cdot DMLT$$

$$4.- qc = qh = Qt$$

$$5.- DMLT = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

Resultado de Iteraciones

$$Tco = 5.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Tho = 52.22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

DMLT

Flujo Contraflujo

$$\Delta T1 = Thi - Tco$$

$$\Delta T2 = Tho - Tci$$

$$\Delta T1 = 54.59 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T2 = 53.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$DMLT = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

$$DMLT = 53.917 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ecuación general de intercambiadores de calor

$$Q1 = Uo \cdot Ao \cdot DMLT$$

$$Q1 = 1.364 \times 10^3 \text{ W}$$

Coraza y Tubos (4) análisis flujo paralelo

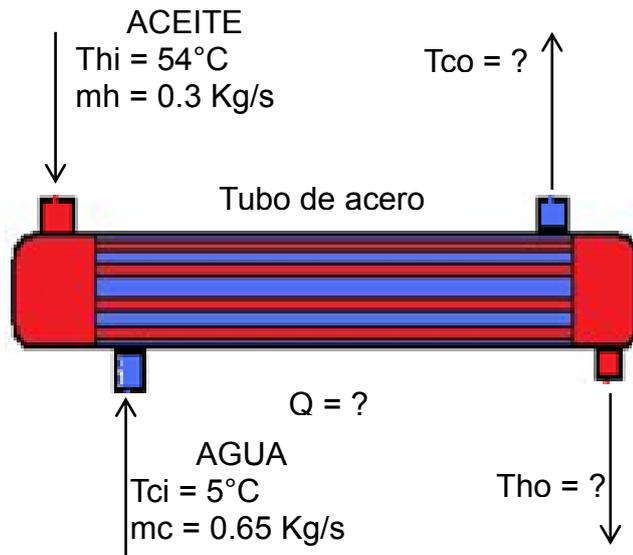


Figura 3.13 Gráfica y esquema del I.C. multitubo flujo paralelo

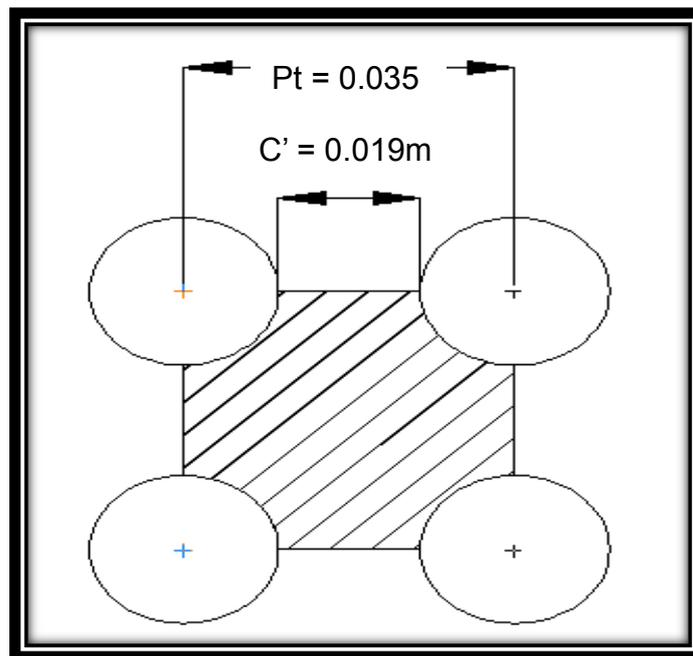


Figura 3.14 Arreglo cuadrado en el I.C. multitubo

Acero

$$K_{ace} = 80.2 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \right)$$

pág. 829 incropera cuarta edición

$$d_o = 0.019 \text{ m} \quad r_o = \frac{d_o}{2}$$

$$d_i = 0.017 \text{ m} \quad r_i = \frac{d_i}{2}$$

$$D_e = 0.127 \text{ m}$$

$$L_e = 0.642 \text{ m}$$

$$\text{Área} = 4 \cdot d_o \cdot \pi \cdot L_e$$

$$\text{Área} = 0.153 \text{ m}^2$$

$$A_o = \text{área}$$

Datos:

Fluido Frío

Agua

Calor Específico

$$C_{pc} = 4198 \text{ (J/Kg} \cdot \text{°K)}$$

Densidad

$$\rho_c = 999.8 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Viscosidad

$$\mu_c = 1.452 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Conductividad Térmica

$$k_c = 0.58 \text{ (w/m} \cdot \text{°K)}$$

Prandtl

$$Pr_c = 12.22$$

Temperaturas De Entrada

$$T_{ci} = 5 \text{ °C}$$

Flujo Másico

$$m_c = 0.65 \text{ (Kg/s)}$$

Fluido Caliente

Aceite

$$C_{ph} = 2500 \text{ (J/Kg} \cdot \text{°K)}$$

$$\rho_h = 884 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\mu_h = 1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$k_h = 1.41 \text{ (w/m} \cdot \text{°K)}$$

$$Pr_h = 2012$$

$$T_{hi} = 54 \text{ °C}$$

$$m_h = 0.3 \text{ (kg/s)}$$

Diámetro equivalente

Pt es el espacio entre los tubos menos sus radios

$$Deq = 4 \cdot \left(\frac{Pt^2 - \pi \cdot \left(\frac{do^2}{4} \right)}{\pi \cdot do} \right)$$

$$Deq = 0.063$$

Diámetro hidráulico

$$Dh = De - Deq$$

$$Dh = 0.064$$

Incropera pág. 595

Número de Reynolds

$$Reo = \left(\frac{4 \cdot mc}{\pi \cdot (De + Deq) \cdot \mu c} \right)$$

$$Rei = \left(\frac{mh}{\pi \cdot di \cdot \mu h} \right)$$

$$Reo = 3.062 \times 10^3$$

$$Rei = 4.68$$

Flujo turbulento

Flujo laminar

Factor de fricción

$$f = (0.790 \ln(Reo) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 0.042$$

Incropera pág. 424

Número de Nusselt

$$Nu_o = \frac{\left(\frac{f}{8} \right) \cdot (Re_o - 1000) \cdot Pr_c}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right)^{0.5} \cdot \left(Pr_c^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}$$

$$Nu_o = 101.458$$

$$Nu_i = 4.36$$

Incropera pág. 445

Coefficiente de transferencia de calor h

$$h_o = \left(\frac{k_c \cdot Nu_o}{D_h} \right)$$

$$h_i = \left(\frac{k_h \cdot Nu_i}{d_i} \right)$$

$$h_o = 920.763 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$h_i = 355.76 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

Coefficiente global de transferencia de calor

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i \cdot h_i} + \frac{r_o \cdot R_{di}}{r_i} + \frac{r_o}{k_{cu}} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + R_{do} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_o = 194.397 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

Incropera pág. 586 U_o dentro del rango

Ecuaciones flujo de calor

$$1.- q_h = m_h \cdot C_{ph} (T_{hi} - T_{ho})$$

$$2.- q_c = m_c \cdot C_{pc} (T_{co} - T_{ci})$$

$$3.- Q_t = U_o \cdot A_o \cdot DMLT$$

$$4.- q_c = q_h = Q_t$$

$$5.- DMLT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Resultado de Iteraciones

$$T_{co} = 5.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{ho} = 52.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

DMLT

Flujo Paralelo

$$\Delta T1 = Thi - Tci$$

$$\Delta T2 = Tho - Tco$$

$$\Delta T1 = 49 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T2 = 46.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$DMLT = \frac{\Delta T2 - \Delta T1}{\ln\left(\frac{\Delta T2}{\Delta T1}\right)}$$

$$DMLT = 47.871 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ecuación general de intercambiadores de calor

$$Q1 = Uo \cdot Ao \cdot DMLT$$

$$Q1 = 1.340 \times 10^3 \text{ W}$$

3.2.1.3 Tabulación de resultados obtenidos

Tabla 3.3 Condiciones generales para los cálculos realizados

Condiciones Generales			
Calor específico		Flujo másico	
Cpc (J/Kg°K)	Cph (J/Kg°K)	mc (Kg/s)	mh (Kg/s)
4198	2035	0.65	0.3

Tabla 3.4 Datos de resultados I.C concéntrico flujo contracorriente

Datos Temp. (°C) I.C. CONCÉNTRICO CONTRACORRIENTE												Datos Energía
ITERACIÓN 1				ITERACIÓN 2				ITERACIÓN 3				Calor
Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	W
54	53,45	5	5,2	54	53,50	5	5,09	54	53,69	5	5,07	255.356

Tabla 3.5 Datos de resultados I.C concéntrico flujo paralelo

Datos Temp. (°C) CONCÉNTRICO FLUJO PARALELO												Datos Energía
ITERACIÓN 1				ITERACIÓN 2				ITERACIÓN 3				Calor
Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	W
54	53,47	5	5,13	54	53,52	5	5,11	54	53,68	5	5,07	255.250

Tabla 3.6 Datos de resultados I.C multitubo flujo contracorriente

Datos Temp. (°C) MULTITUBOS CONTRACORRIENE												Datos Energía
ITERACIÓN 1				ITERACIÓN 2				ITERACIÓN 3				Calor
Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	W
54	52,85	5	5,2	54	53,02	5	5,25	54	52,26	5	5,39	1.367×10^3

Tabla 3.7 Datos de resultados I.C multitubo flujo paralelo

Datos Temp. (°C) MULTITUBOS FLUJO PARALELO												Datos Energía
ITERACIÓN 1				ITERACIÓN 2				ITERACIÓN 3				Calor
Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	W
54	52,34	5	5,24	54	52,20	5	5,32	54	52,24	5	5,4	1.306×10^3

3.2.2 DISEÑO Y ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

Para el cálculo de la resistencia se usa la ecuación general de flujo de calor
Datos:

ACEITE

Calor específico

$$C_{ph} = 2035 \text{ (J/Kg} \cdot \text{°K)}$$

Densidad

$$\rho_h = 884 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Diferencia de Temperaturas

$$T_{hi} = 21 \text{ °C}$$

$$T_{ho} = 60 \text{ °C}$$

$$\Delta T = T_{ho} - T_{hi}$$

Masa de Aceite

$$m_h = 50 \text{ kg}$$

Flujo de calor

$$Q_h = m_h \cdot C_{ph} \cdot \Delta T$$

$$Q_h = 3.765 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Resistencia Requerida Hora

$$Q_t = Q_h / 3600000$$

$$Q_t = 1.046 \text{ kw}$$

Para 45 minutos

$$Q = 1.39 \text{ kw}$$

3.3 DETERMINACIÓN DE INSTRUMENTOS

3.3.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS INSTRUMENTOS

CAUDALÍMETROS

Especificaciones técnicas de los medidores de caudal

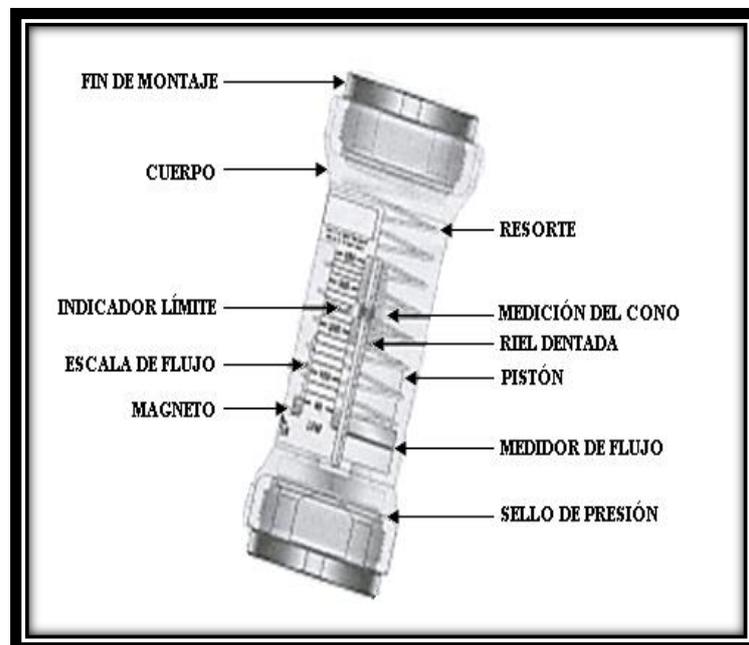


Figura 3.15 Partes de un caudalímetro

Tabla 3.8 Especificaciones técnicas de los rotámetros

Descripción	Especificaciones
Precisión	± 5 de 0 – 70 litros / minuto
Repetitividad	± 1%
Grado de la presión	325 psi (22,4 bar) máxima
Rango de temperatura	32 ° F a 250 ° F (0 ° C a 121 ° C)
Tipo 1 accesorios de PVC	ASME ANSI B1.20.1 NPT
	BSPT ISOR7
	BSPP ISO228
Materiales (mojado):	Polisulfona
	Cono polisulfona
	Primavera T300 de acero inoxidable
	Anillos de retención de acero inoxidable PH15-7mo
	Juntas de Buna-N
	Indicador de timbre Buna-N
Indicadores	Límite de polipropileno
	Imán de ferrita de estroncio
Materiales (no mojada)	Indicador de polipropileno
	Escala de poliéster
Calibración de fluidos	
Aceite de 0.871 gravedad específica	Viscosidad 32 cSt
El agua 1.0 gravedad específica	Viscosidad 1,0 cSt

CONTROLES DIGITALES DE TEMPERATURA (Agua)



Figura 3.16 Controles digitales de temperatura para el agua

Tabla 3.9 Especificaciones técnicas del control digital TC-900RI

ALIMENTACIÓN:	TC-900Ri power: 90 – 264 Vac±10%(50/60Hz)
TEMPERATURA DE CONTROL:	-50 hasta 75°C / -58 hasta 167°F
TEMPERATURA DE OPERACIÓN:	-10°C hasta 50°C / 32 hasta 122°F
HUMEDAD DE OPERACIÓN:	10 hasta 90% HR (sin condensación)
RESOLUCIÓN:	0.1°C entre -10 y 75°C y 1°C entre -50 y -10°C
SENSORES:	S1: Sensor de ambiente (negro) S2: Sensor preso al evaporador (gris)

CONTROLES DIGITALES DE TEMPERATURA (Aceite)



Figura 3.17 Control digital de temperatura para el aceite

Tabla 3.10 Especificaciones técnicas del control digital MT-516CVT

ALIMENTACIÓN:	240 Vac ± 25% (50/60Hz)
TEMPERATURA DE CONTROL:	-50 hasta 75°C / -58 hasta 167°F
TEMPERATURA DE OPERACIÓN:	-10°C hasta 50°C / 32 hasta 122°F
HUMEDAD DE OPERACIÓN:	10 hasta 90% HR (sin condensación)
RESOLUCIÓN:	0.1°C entre -10 y 75°C y 1°C entre -50 y -10°C
DIMENSIONES:	71x28x71 mm
SENSORES:	S1: Sensor de ambiente (negro)
	S2: Sensor preso al evaporador (gris)

3.4 SIMULACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR POR MÉTODO COMPUTACIONAL USANDO ANSYS.

Se utilizó el programa ANSYS para el análisis y simulación de los intercambiadores de calor. A continuación se muestra los pasos que debe seguir para crear el diseño del intercambiador de calor en el programa.

3.4.1 DETALLE DE DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Intercambiador de calor (tubo concéntrico)

Generación de un modelo para definir los volúmenes de control. En el presente caso, el modelo fue realizado en DESIGNMODELER de ANSYS. En el proyecto en página en blanco del Work bench selección del programa que se va a utilizar con el título de Analisis Systems tenemos una lista donde se observan todos los

subprogramas que contiene el Ansys en el caso del presente proyecto se selecciona Fluid Flow (CFX) y lo arrastramos hacia la el Project Schematic donde aparecerá un cuadro con las opciones del proceso como se muestra en el la siguiente figura.

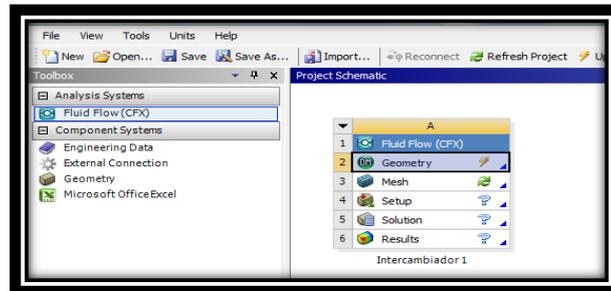


Figura 3.18 Opciones de proceso (ANSYS)

Se procese a cambiar el nombre y guardar el proyecto, siguiendo con el orden de los procesos, sí no se va a importar la geometría se lo puede realizar en el modelador de diseño del programa seleccionando nueva geometría y utilizando las opciones de dibujo como se muestra en la siguiente figura.

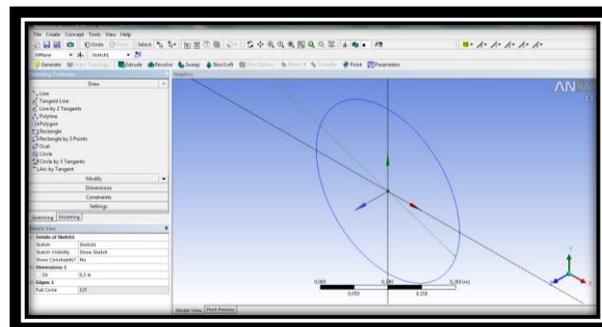


Figura 3.19 Modelador de diseño (ANSYS)

Después de realizado el dibujo requerido se tiene en cuenta que deben ser para este caso donde serán utilizados dos cuerpos conteniendo dos diferentes fluidos serán concretados como independientes para definir los volúmenes de control de agua y aceite se utiliza el comando freeze. Se ha simplificado a las dimensiones funcionales, a continuación se presenta la figura cuando ya ha sido dibujada tomando en cuenta los parámetros anteriores.

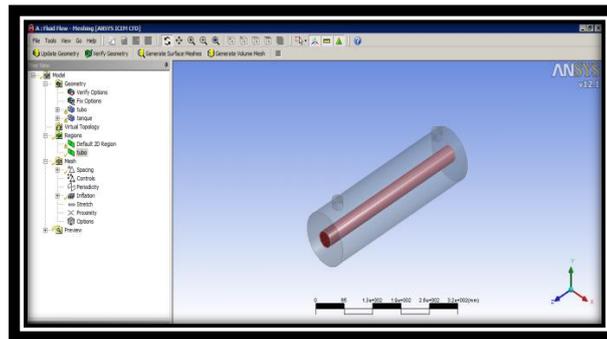


Figura 3.20 Resultado del modelo (ANSYS)

En la generación de una malla para el proceso de cálculo se debe trabajar en el entorno de mallado para CFX ya que este es el indicado para fluidos, se puede tomar otros pero esto dependerá de los parámetros que se requiere para diferentes métodos de mallado, se selección de los cuerpos sólidos para la definición de las regiones 2D para mallado, la región 2D en el cuerpo Tubo se trata de la superficie cilíndrica que sirve como interfaz agua – cobre.

En la definición del tamaño de malla en la superficie 2D Tubo se usa Inflated Boundary en la superficie Tubo se genera de una vista previa de la malla generada según parámetros establecidos.

En la parte superior de la ventana ANSYS Work bench, usted debería ser capaz de ver dos pestañas Static Mixer (del proyecto) Static Mixer (Design Modeler). Haga clic en Static Mixer (proyecto) para volver a la página del proyecto. En la columna de la izquierda, cerca de la cima, ahora debería ver una entrada Generar CFX malla. Haga clic en este. CFX-acoplamiento se abrirá.

En la vista Detalles, el cambio máximo espaciado a 0,3 m. Se trata de una escala de longitud secundaria para este modelo, pero es razonable para una primera corrida generar una solución aproximada y probar que el modelo funciona correctamente. Pulse Intro en el teclado para establecer este valor. Los ajustes restantes quedarán como por defecto. Generación de la superficie de la malla ahora va a echar un vistazo a la malla de la superficie para ver el efecto de la escala de longitud elegida. Haga clic en el signo más junto a Vista previa en la vista en árbol para abrirlo. Haga click sobre la vista previa por defecto de grupo y

seleccione Generar Esta malla de superficie. La vista previa por defecto Grupo siempre contiene todos los rostros en la geometría, por lo que la malla se genera en todas partes. Durante la generación de la malla de superficie, el progreso se mostrará en la barra de desplazamiento que parece en la parte inferior izquierda de la ventana CFX - Mesh.

Puede modificar la forma en que la malla se muestra al hacer clic en Vista previa en la vista de árbol y el cambio las opciones que aparecen en la vista Detalles. Por ejemplo, al cambiar el modo de visualización se puede cambiar a mostrar la malla en lugar de con las caras del sólido. Simplemente haga clic en el nombre por defecto en vista previa

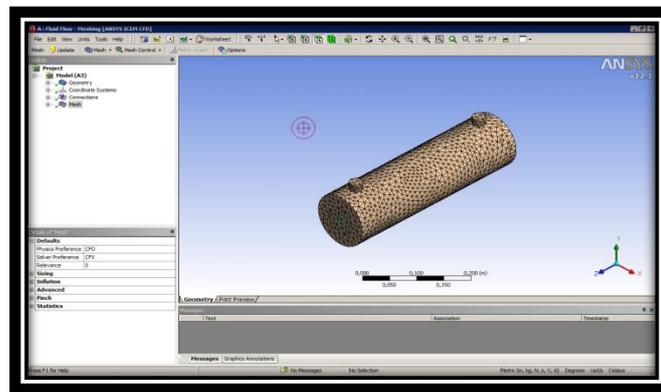


Figura 3.21 Mallado (ANSYS)

Para las condiciones de borde se definen los volúmenes de control e interfaces de contacto entre dominios. Definición del volumen de control Aceite y definición de volumen de control Agua. Condiciones de borde de área de entrada de fluido para el dominio Aceite y selección de la superficie mallada correspondiente a la entrada de flujo de aceite en el dominio de control Aceite.

En este caso se elige para el mallado CFX que es el predeterminado para el mallado de control de fluidos y serán explicados posteriormente para la solución y definición de ecuaciones que rigen el comportamiento del fluido.

A continuación se muestra la figura luego de las condiciones de borde y entrada y salida de los fluidos.

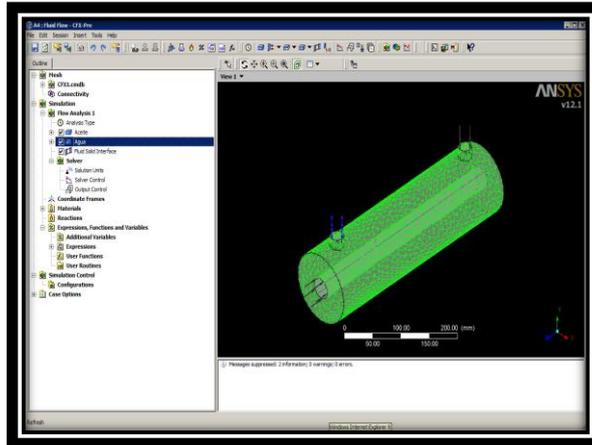


Figura 3.22 Condiciones de borde (ANSYS)

Definición de la condición de borde, flujo de masa, temperatura, dirección, y definición de la salida de flujo de Aceite. Selección de la superficie mallada por donde saldrá el flujo. Determinación de las condiciones de salida y definición de la interfaz fluido solido en el volumen de control ACEITE. Condiciones de borde y definición del volumen de control AGUA.

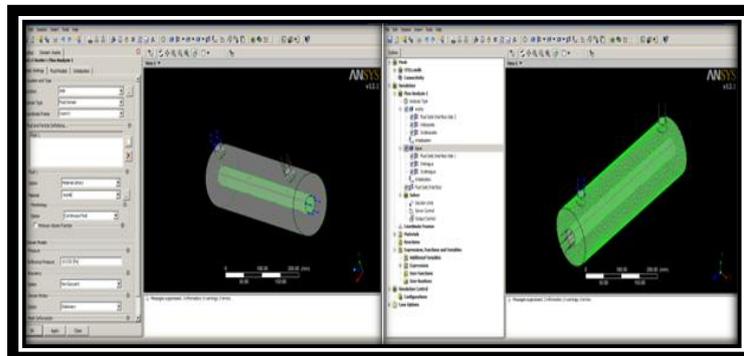


Figura 3.23 Condiciones de borde Aceite y Agua (ANSYS)

Definición de la entrada de fluido en el volumen de control Agua y definición de salida de fluido en volumen de control Agua antes de los parámetros de borde para salida de fluido. Luego las definición de superficies que sirven como interfaces entre los diferentes volúmenes de control de coloca las definiciones de las expresiones que gobiernan los datos de salida de agua y aceite.

Para establecimiento de los parámetros del Solver tenemos en cuenta las ecuaciones que gobiernan la solución.

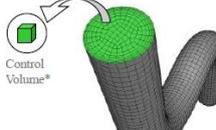
$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Unsteady}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Advection}} = \underbrace{\oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Generation}}$$


Figura 3.24 Ecuación gobernante de continuidad (ANSYS)

Para el grado de resolución de la malla se requiere en cada región del dominio la malla las características geométricas de interés y la captura de los gradientes de interés por ejemplo, velocidad, presión, gradientes de temperatura y puede predecir las regiones de los gradientes para lo cual se definirá la forma y el tamaño dependiendo de las condiciones de cada caso, a continuación se muestra las formas de mallado que se puede utilizar en el programa de las cuales se ha elegido tetraedros bajo las formulas del ANSYS como default al mallado por CFX.

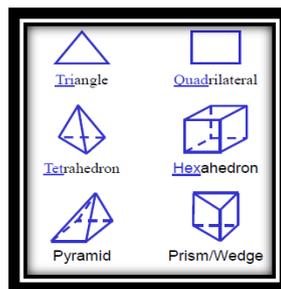


Figura 3.25 Elementos de construcción de volúmenes de control (ANSYS)

Establecimiento de la clase de ecuaciones que se utilizará en el modelo a resolver se muestra a continuación.

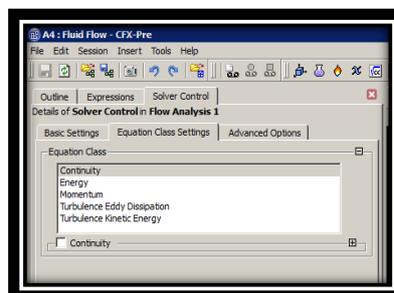


Figura 3.26 Selección de fórmulas usadas por CFX (ANSYS)

Después de seleccionar las ecuaciones que serán utilizadas para las soluciones corremos el Solver. Guardando configuración de cálculo y ejecutando.

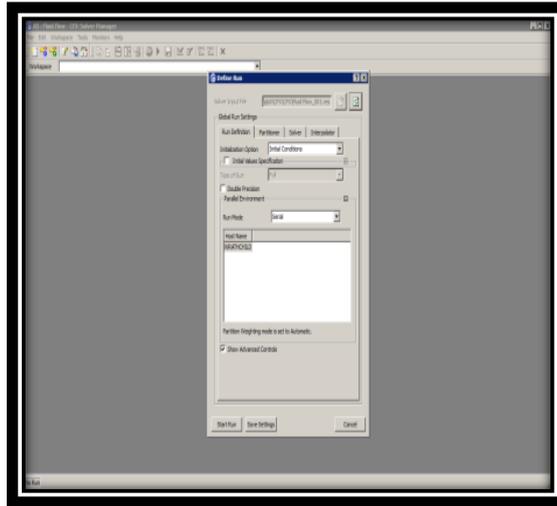


Figura 3.27 Configuración Solver (ANSYS)

Ventana gráfica donde muestra la ejecución del cálculo. Se muestra una ventana donde se puede monitorear el comportamiento de la transferencia de calor, durante el tiempo establecido para las iteraciones.

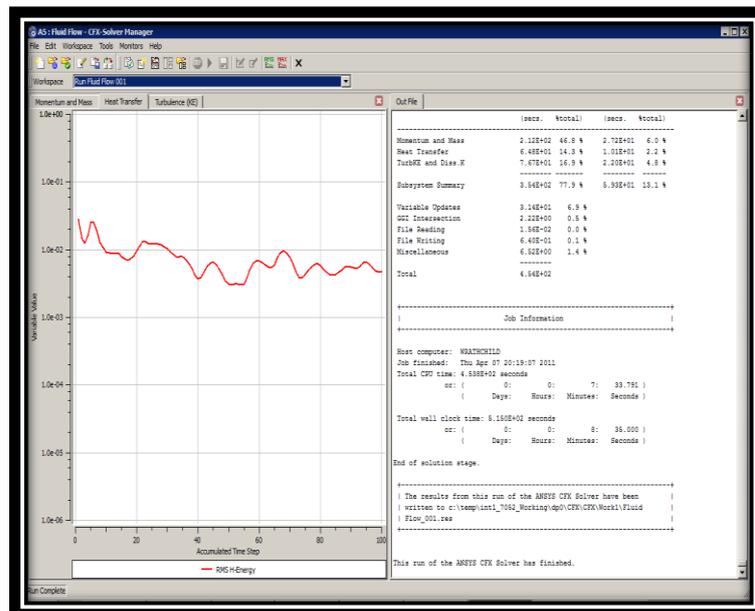


Figura 3.28 Comportamiento de transferencia de calor (ANSYS)

Salida de resultados. Se muestra el campo de temperaturas en el volumen de control Agua y Aceite, con las líneas de los respectivos flujos.

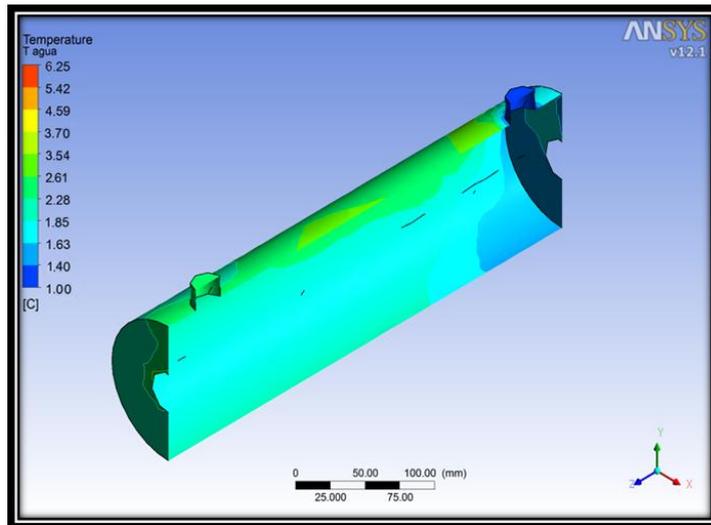


Figura 3.29 Resultado gráfico temperatura Agua (ANSYS)

Líneas de flujo de aceite en volumen de control ACEITE. Se nota que son líneas suaves, indicando que se trata de un flujo laminar y en el flujo de agua en volumen de control AGUA. Se nota que se trata de un flujo turbulento.

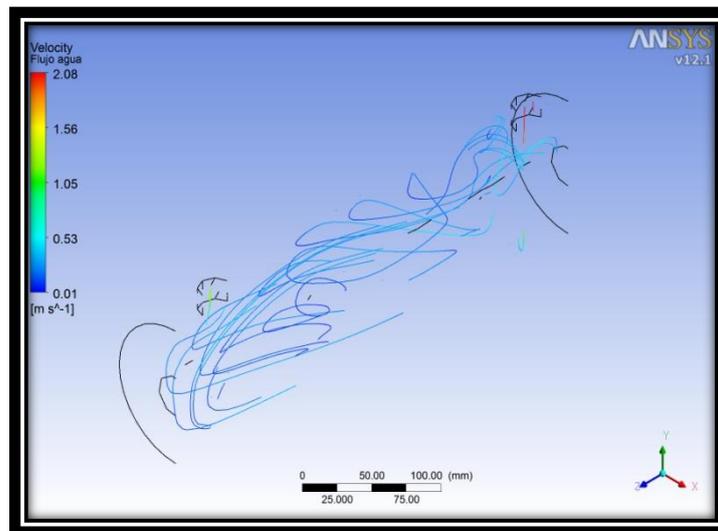


Figura 3.30 Resultado gráfico de velocidad Agua (ANSYS)

En la figura anterior se puede observar la dirección del flujo y la velocidad de las partículas dentro del intercambiador de calor para el fluido frío en este caso Agua.

Intercambiador multitubo (4 tubos)

Para el caso del intercambiador multitubos se realiza un análisis de movimiento del fluido de igual manera se usa el Design Modeler para realizar el modelado de los cuerpos que definen los volúmenes de control realizando el dibujo del cuerpo de la coraza y luego los tubos. Así una vez terminado se procede a realizar el mallado de igual forma que para el caso anterior dando como resultado como se indica en la siguiente figura.

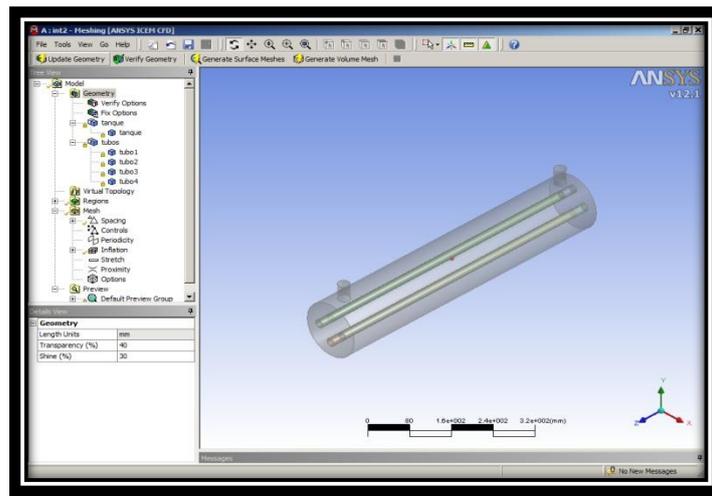


Figura 3.31 Cuerpo I.C. Multitubo (ANSYS)

Para el desarrollo del mallado se realiza la asignación de parámetros de mallado en los cuerpos Coraza y Tubos, las superficies que definen el volumen de control, el dominio de control Aceite. Definición de tamaño de malla en la superficie de control Aceite, a continuación se observa una vista previa del mallado.

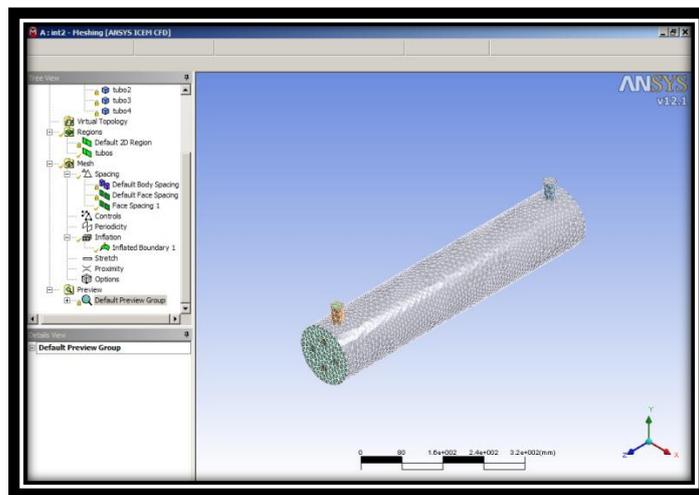


Figura 3.32 Mallado I.C. Multitubo (ANSYS)

Se establece de dominios de control Agua, Aceite e interfaz Solido Líquido y las condiciones de borde para la entrada y salida como interfaz en volumen de control Aceite. Luego se establece las superficies de borde Entrada en volumen de control Aceite donde da como resultado como se muestra en la figura a continuación.

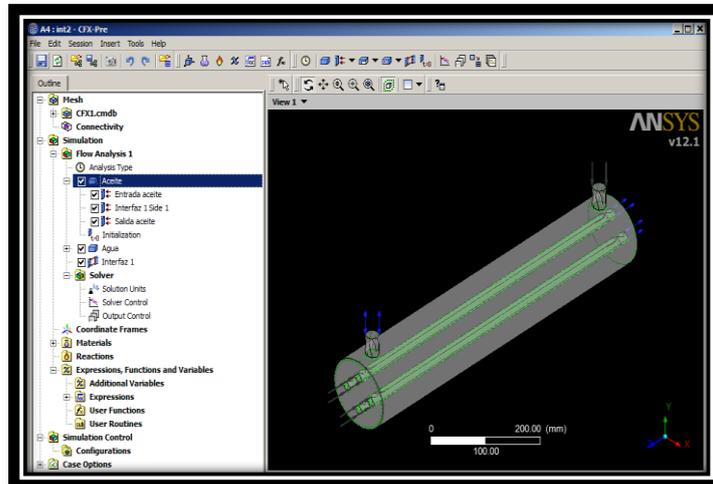


Figura 3.33 Condiciones de Entrada y Salida I.C. Multitubo (ANSYS)

De la misma forma se realiza para las condiciones de borde en el agua y para la entrada y salida donde se establece el flujo másico y los tipos de fluidos, los detalles de borde generados en la entrada dan la opción de colocar que se desea en estático antes de correr el Solver y definiendo las direcciones de flujo para el Agua y el Aceite, a continuación se muestra la ventana donde se colocan las condiciones del flujo.

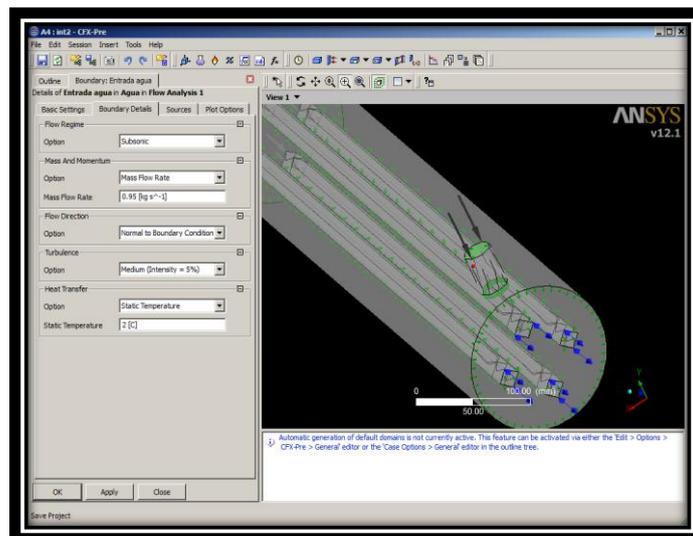


Figura 3.34 Condiciones de flujo Agua I.C. Multitubo (ANSYS)

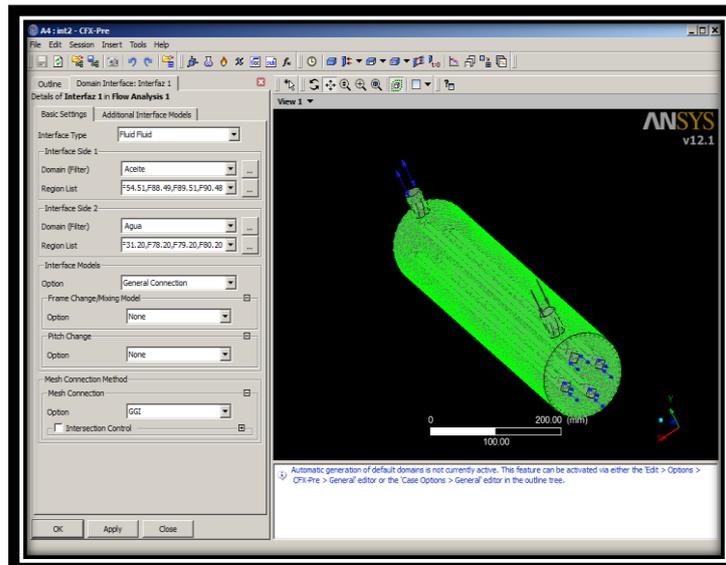


Figura 3.35 Condiciones de flujo Aceite I.C. Multitubo (ANSYS)

A continuación se muestra la figura de la ventana donde se define las opciones para que el Solver realice la solución.

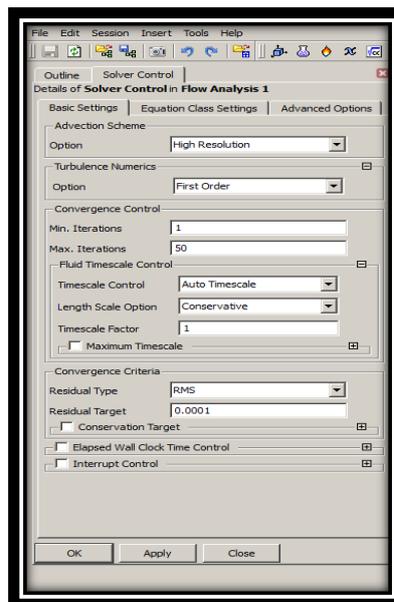


Figura 3.36 Opciones para el Solver (ANSYS)

Entonces está listo para ejecutar cálculo en la ejecución del cálculo realizada se observa gráfica de variable Transferencia de Calor, y texto con detalles de la simulación. A continuación se presenta la figura donde representa el comportamiento del flujo

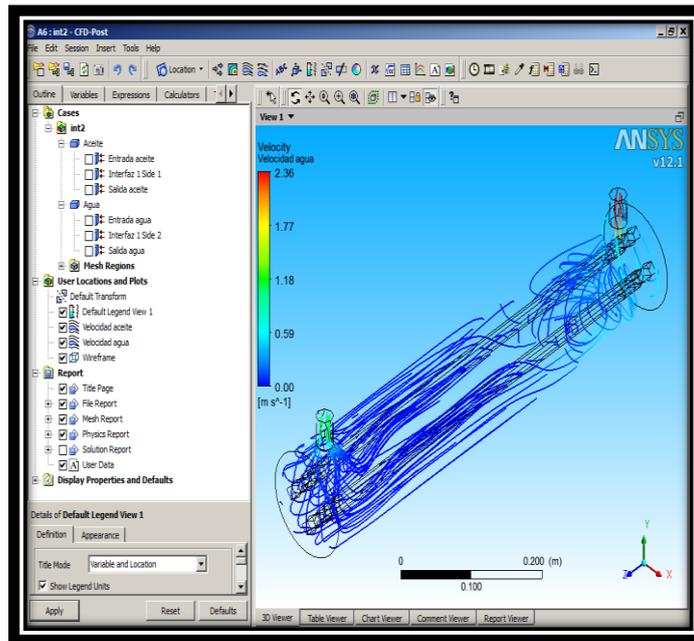


Figura 3.37 Comportamiento del flujo Agua (ANSYS)

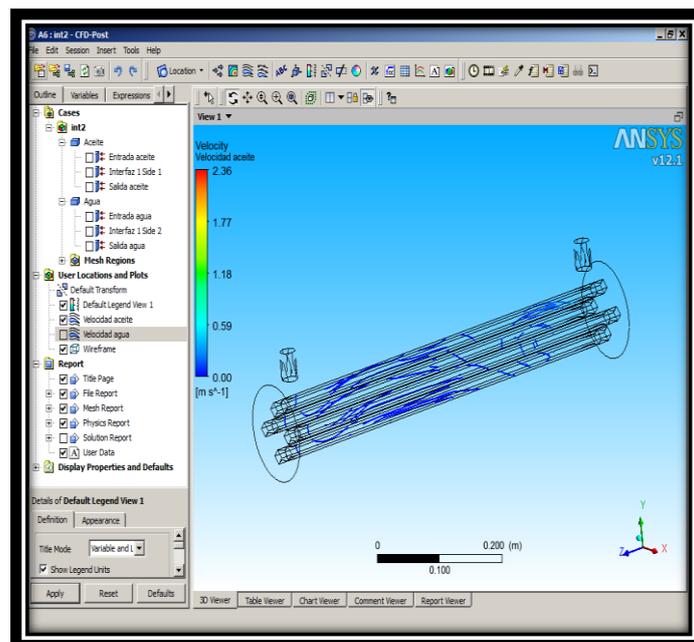


Figura 3.38 Comportamiento del flujo Aceite (ANSYS)

En estos dos últimos gráficos se observa que el fluido Agua se encuentra en un movimiento más fuerte y sus líneas de representación tienen vórtices y remolinos lo que nos deja saber que se trata de un flujo turbulento a diferencia de flujo de Aceite donde las líneas son más suaves y podemos observar que se trata de un flujo laminar.

3.4.2 TOMA DE DATOS ANSYS

Para tomar los resultados luego de correr el Solver se mueve el cursor hacia el icono de Tools y luego se presiona Probe para generar una regleta en la parte inferior del gráfico como se observa en la figura 3.28 y selección del resultado a puntualizar en este caso se toma la temperatura en grados Kelvin como se muestra a continuación.

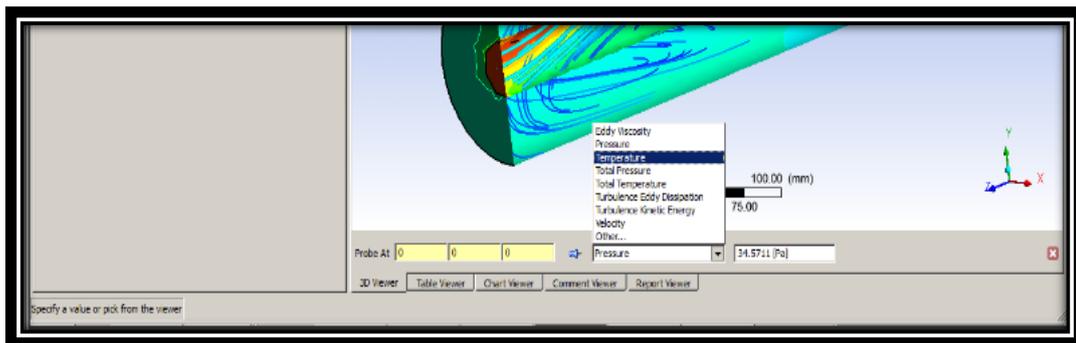


Figura 3.39 Selección de unidades (ANSYS)

Se puede elegir por medio del puntero o por coordenadas específicas los puntos a ser analizados

3.4.3 TABULACIÓN DE RESULTADOS ANSYS

Tabla 3.11 Tabla de resultados promedio de temperaturas

Datos Temp. (°C)											
Medición 1				Medición 2				Medición 3			
Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco
54	50,43	5	7,93	54	51,61	5	6,95	54	50,45	5	7,2

Esquema

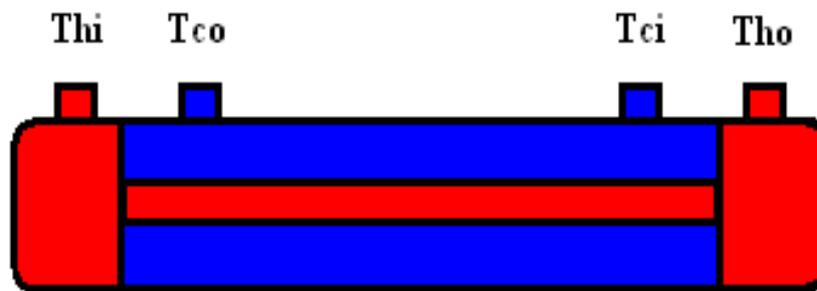


Figura 3.40 Esquema del I.C. concéntrico

Resultados

Tabla 3.12 Tabla de resultados finales

ANSYS, Datos Temp. (°C)			
Thi	Tho	Tci	Tco
54	50,45	5	7.5

CAPÍTULO 4

INGENIERÍA DE DETALLE

4.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EQUIPO

El banco de pruebas para intercambiadores de calor aceite-agua en flujo paralelo y contraflujo está compuesto por los siguientes sistemas y partes principales:

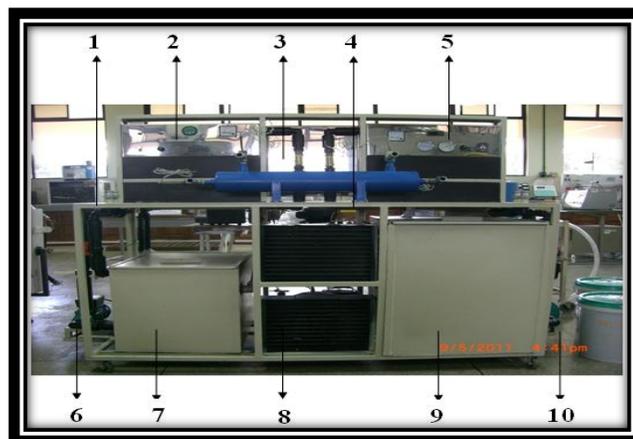


Figura 4.1 Partes del banco de pruebas (vista frontal)

1. Acoples para manguera de presión de $\frac{3}{4}$ de pulgada
2. Panel de control lado caliente
3. Medidores de caudal (rotámetros)
4. Intercambiador de calor
5. Panel de control lado caliente
6. Bomba de aceite de $\frac{3}{4}$ de HP
7. Tanque de almacenamiento de aceite de acero reforzado
8. Unidades de refrigeración
9. Tanque de almacenamiento de agua de acero reforzado

10. Bomba de agua de 1 HP

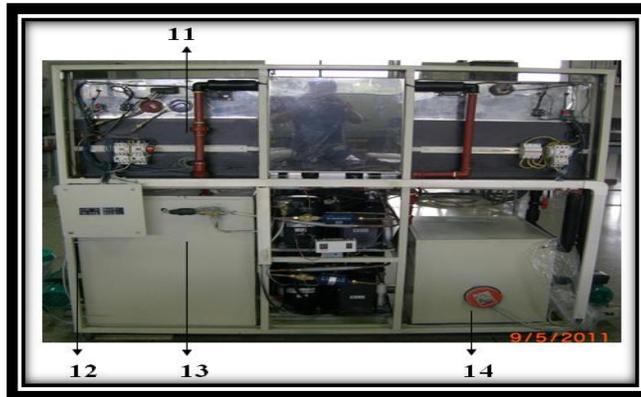


Figura 4.2 Partes del banco de pruebas vista posterior

- 11. Tubería PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada
- 12. Caja de control eléctrico
- 13. Válvula de expansión
- 14. Resistencia eléctrica de 1.5kw/h

4.2 INSTALACIONES ELÉCTRICAS E INSTRUMENTACIÓN

Se ha instalado la instrumentación necesaria para su óptimo funcionamiento. A continuación se dará a conocer cada elemento y su descripción.

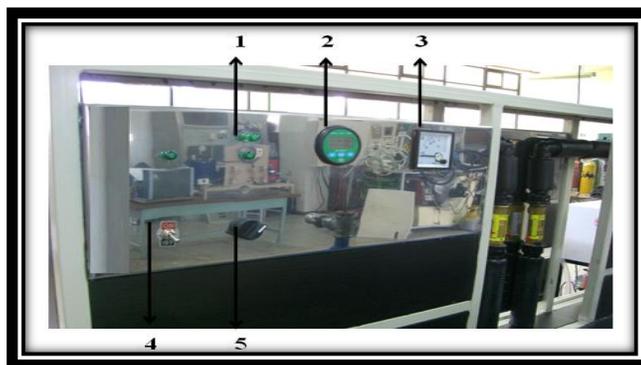


Figura 4.3 Panel de control lado caliente (vista frontal)

1. Leds de control de encendido
2. Control digital de temperatura para el aceite
3. Amperímetro para la resistencia eléctrica
4. Switch de encendido y apagado de la resistencia
5. Switch de encendido y apagado de la bomba de aceite

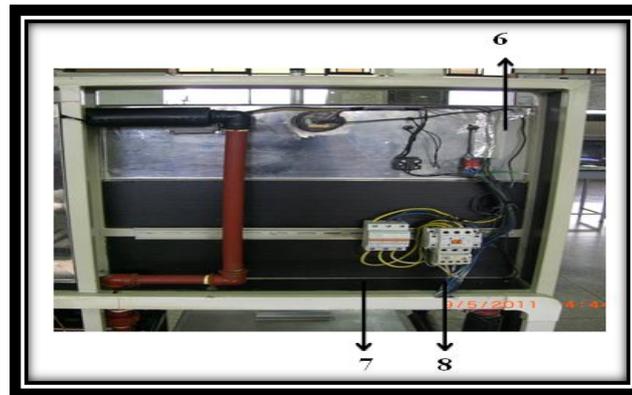


Figura 4.4 Panel de control lado caliente (vista posterior)

6. Cable flexible número 10, 12 y 18
7. Breaker trifásico
8. Relé de protección térmica

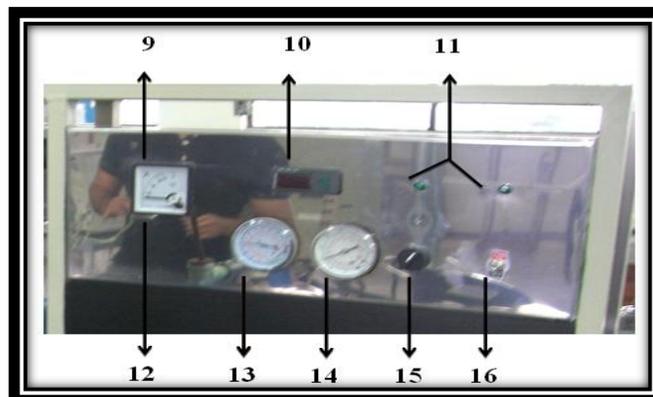


Figura 4.5 Panel de control lado frío (vista frontal)

9. Amperímetro para los sistemas de refrigeración
10. Control digital de temperatura para el agua

11. Leds de control de encendido unidades de refrigeración y bomba de agua
12. Amperímetro para los sistemas de refrigeración
13. Manómetro para la unidad 1 de refrigeración
14. Manómetro para la unidad 2 de refrigeración
15. Switch de encendido y apagado de la bomba de agua
16. Switch de encendido y apagado de las unidades de refrigeración

Además cuenta con un equipo termómetro eléctrico td-30 que permite la lectura directa de las temperaturas mediante un display.



Figura 4.6 Termómetro digital para toma de datos

Las termocuplas empleadas en el banco de pruebas son de tipo j. En la siguiente tabla se indica cómo están establecidas las conexiones para la toma de datos de las temperaturas.

Tabla 4.1 Funcionamiento de las termocuplas en el sistema

TERMOCUPLA	FUNCIONAMIENTO
Termocupla 1	Entrada de agua
Termocupla 2	Salida de agua
Termocupla 3	Entrada de aceite
Termocupla 4	Salida de aceite

4.3 LISTADO DE INSTRUMENTOS Y MATERIALES

A continuación se detalla las siguientes tablas de todos los instrumentos y materiales utilizados

Intercambiadores de calor:

Tabla 4.2 Listado de equipos utilizados en los I.C.

Cantidad	Descripción
1	Intercambiador de calor (tubo concéntrico)
1	Intercambiador de calor (Multitubo)
4	Acoples de conexión de mangueras
4	Mangueras de alta presión

Sistema de refrigeración:

Tabla 4.3 Listado de equipos utilizados en el sistema de refrigeración

Cantidad	Descripción
1	Tanque de almacenamiento de agua
1	Aislamiento térmico para el tanque
2	Unidades de refrigeración
1	Válvula de expansión
1	Bomba de Agua

Sistema de calentamiento:

Tabla 4.4 Listado de equipos utilizados en el sistema de calentamiento

Cantidad	Descripción
1	Tanque de almacenamiento de aceite
1	Aislamiento térmico para el tanque
1	Resistencia eléctrica
1	Bomba de aceite

Instrumentación:

Tabla 4.5 Listado de equipos utilizados para la instrumentación

Cantidad	Descripción
1	Control digital de temperatura para aceite
1	Control digital de temperatura para agua
1	Medidor de caudal (agua)
1	Medidor de caudal (aceite)
2	Amperímetro
1	Termómetro digital
2	Manómetro
2	breaker trifásico
2	Rele de protección térmica
8	Termocuplas tipo J
4	Switch de encendido ON/OFF
1	Caja de control eléctrico (caja de breaker)

Materiales y accesorios:

Tabla 4.6 Listado de materiales y accesorios utilizados en el Banco

Cantidad	Descripción
S/E	Tubería de 3/4 PVC
S/E	Tubería 1 pulgada PVC
4	ACOPLES de 3/4 y 1"
2	Llaves de paso
2	Válvula de globo
S/E	Codo de 3/4 y 1"
S/E	Acoples Tipo T de 3/4 y 1"
S/E	Cable flexible #10
S/E	Cable flexible #12
S/E	Rollo tubería de cobre de 3/8"
2	Válvula solenoide
S/E	ACEITE DE TRABAJO SAE 10 REPSOL
S/E	ACEITE LUBRICANTE LIMPIADOR
S/E	TUBO CUADRADO 1"*2 mm
S/E	Acero inoxidable plancha 1.5 mm
S/E	CARGA GAS NITROGENO
S/E	VISOR DEL LIQUIDO 3/8"
S/E	Accesorios (teflón, taípe, herramientas,
S/E	empaques, selladores, etc.

4.4 PLANOS DE LA ESTRUCTURA

ANEXO E

4.5 PLANOS DEL PANEL

ANEXO F

4.6 PLANOS DE LOS I.C

ANEXO G

4.7 PLANOS DE LA RED DE FLUJO DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO

ANEXO H

4.8 PLANOS DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

ANEXO I

CAPÍTULO 5

CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

5.1 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL BANCO.

Para realizar la construcción del banco se hizo un estudio previo sobre el espacio en el cual estarían situados cada uno de los elementos principalmente los sistemas de refrigeración y calentamiento que son los que constituyen el mayor peso y tamaño, donde se obtuvo el siguiente grafico preliminar.

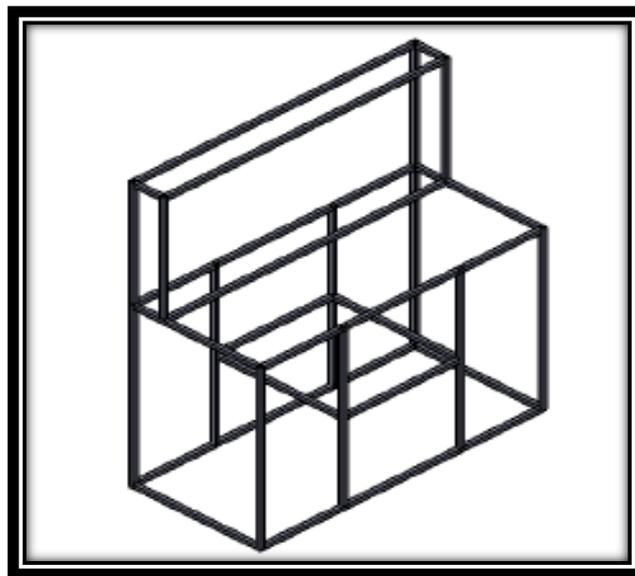


Figura 5.1 Estructura preliminar del banco de pruebas

Al tener los datos sobre los pesos y un diseño el cual está explicado en el capítulo 3 mediante el programa SAP 2000 se ha logrado construir y demostrar que la estructura soporta los pesos de cada elemento que conforman el banco de pruebas.

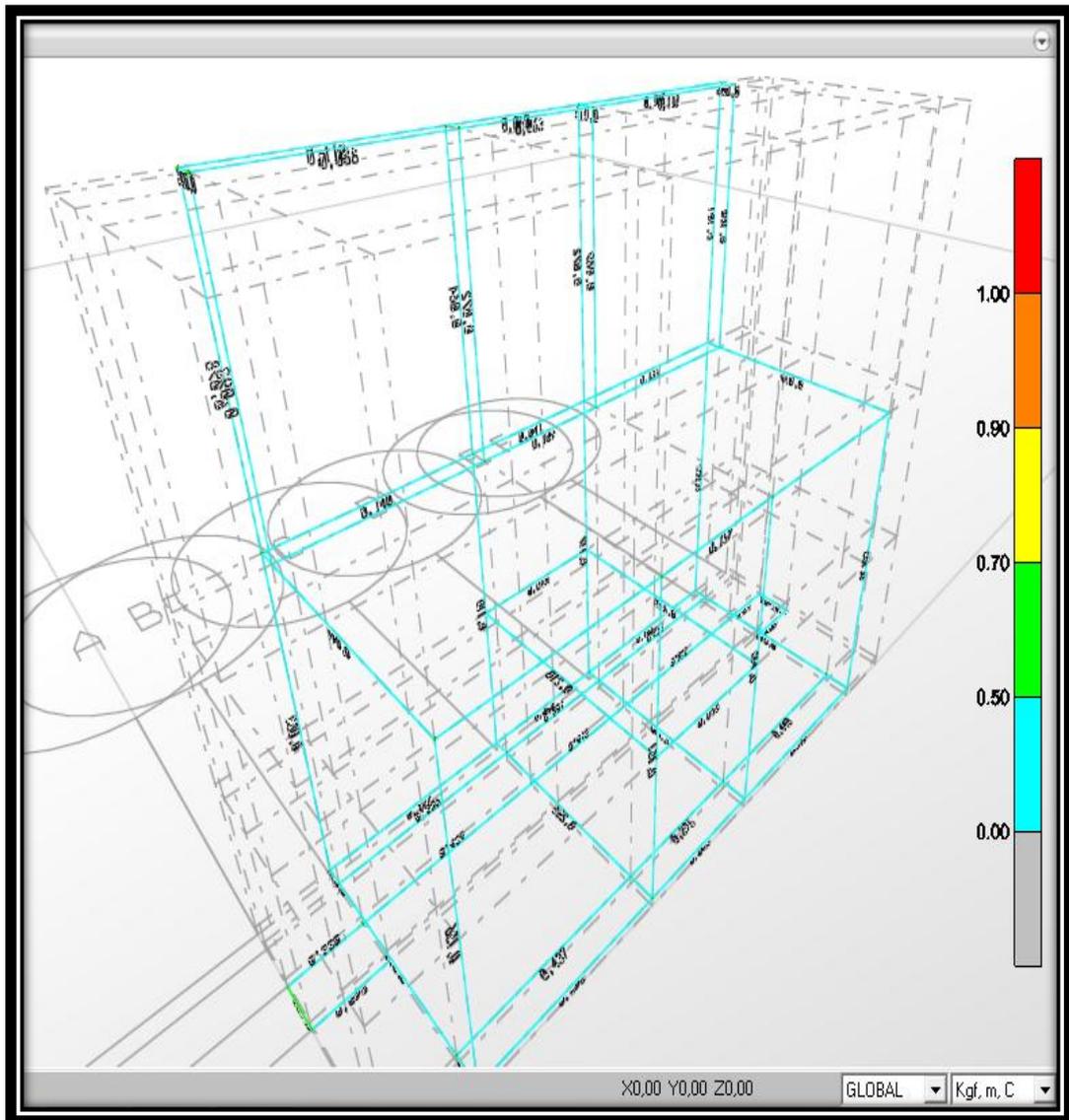
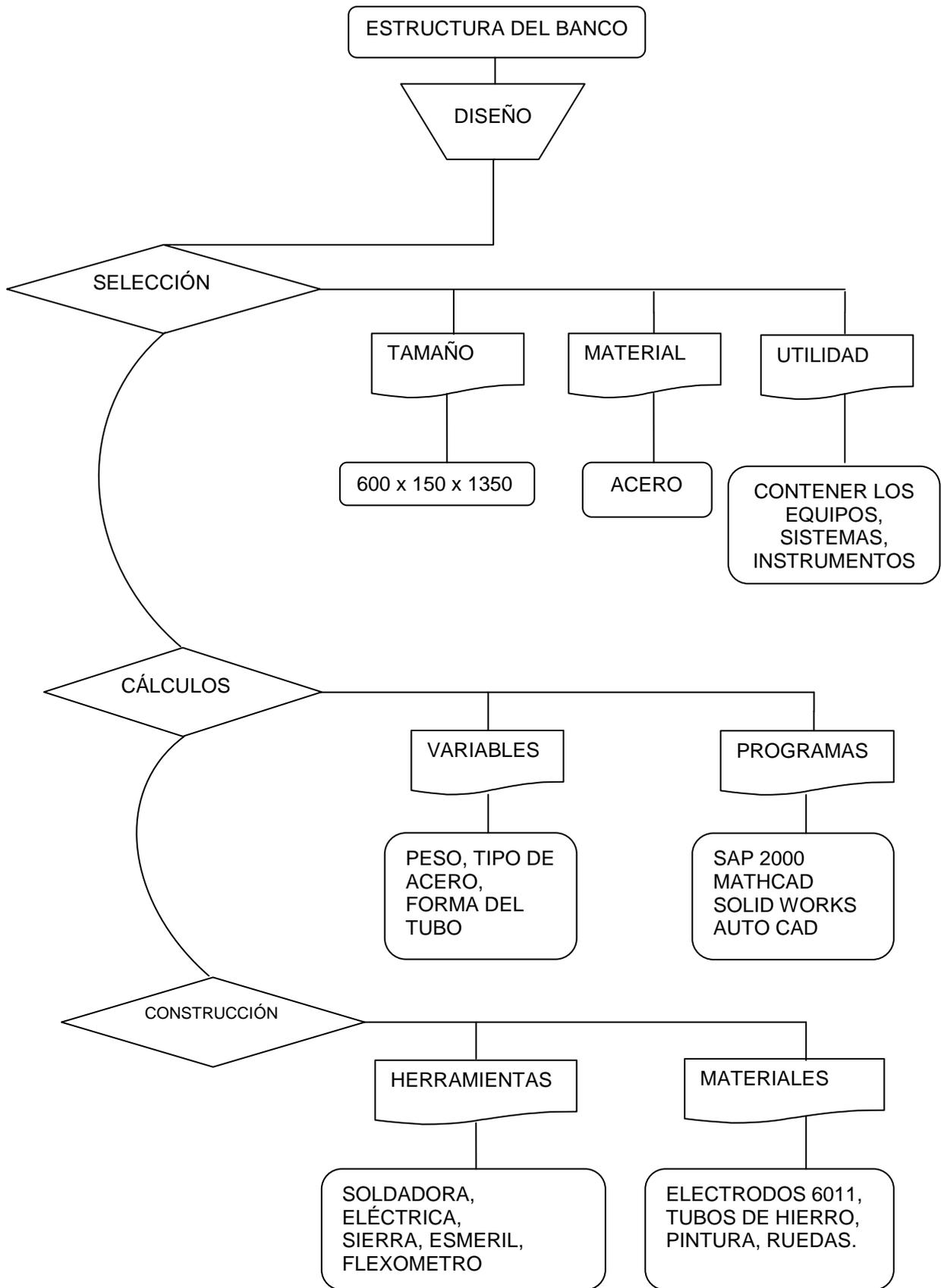


Figura 5.2 Estructura finalizada del banco de pruebas

Nótese que cada elemento en la estructura se encuentra en la zona azul de esfuerzo versus deformación, esto quiere decir que la estructura soporta tranquilamente las cargas de los componentes que conforman el banco de pruebas.



5.2 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LOS I.C.

La construcción de los intercambiadores de calor se realizó por medio de cálculos térmicos, los cuales fueron obtenidos utilizando las fórmulas y métodos de los libros Incropera. F – DeWitt D. y Donal Q. Kern, teniendo como sus partes principales: La coraza, dos cabezales, dos entradas, dos salidas y los tubos interiores.



Figura 5.3 Proceso de reconstrucción de los I.C

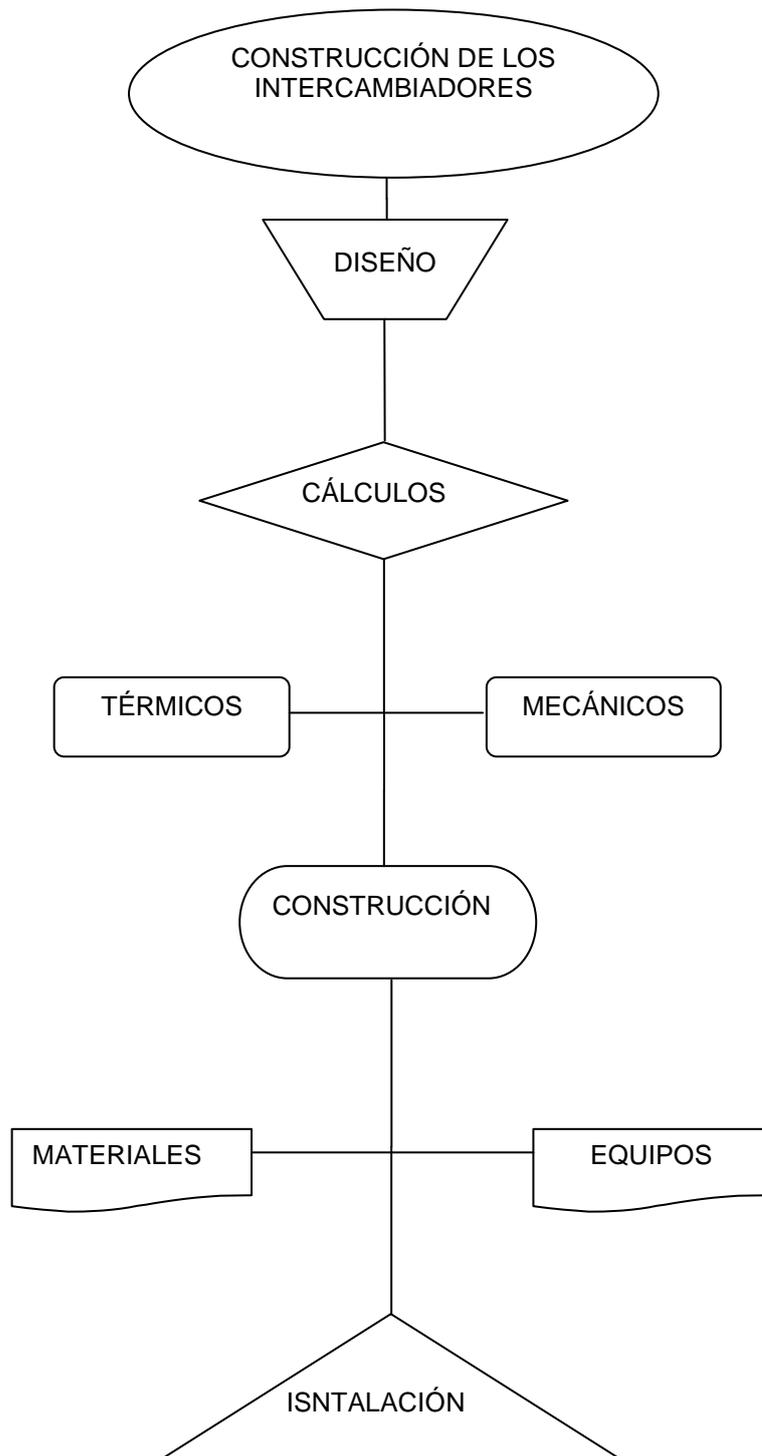
Los I.C. se encuentran conectados permanentemente a la red de la tubería, la cual está diseñada para lograr cambiar el flujo del fluido calo portador sin necesidad de desmontarlo, cada uno de los intercambiadores de calor consta de cuatro termocuplas las cuales se encuentran a la entrada y salida de cada fluido.



Figura 5.4 Toma de medidas de los I.C



Figura 5.5 Foto final del I.C multitubo



5.3 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

En el sistema de calentamiento se requiere que el aceite API que está dentro del tanque de almacenamiento eleve su temperatura mediante una resistencia eléctrica a 60 grados, se mantiene en un rango de 5 grados por medio de un termostato.

Las paredes del tanque interno son de acero inoxidable de 1.5 milímetros de espesor y el tanque externo luego de la espuma aislante de tol negro tiene un espesor de 2 milímetros, el doblado y soldado se realizó con dobladora de 400 Newton de presión y suelda Tig.

La bomba que traslada el aceite hacia los intercambiadores de calor es de 3/4 HP con características propias que están definidas anteriormente en el Capítulo 2.

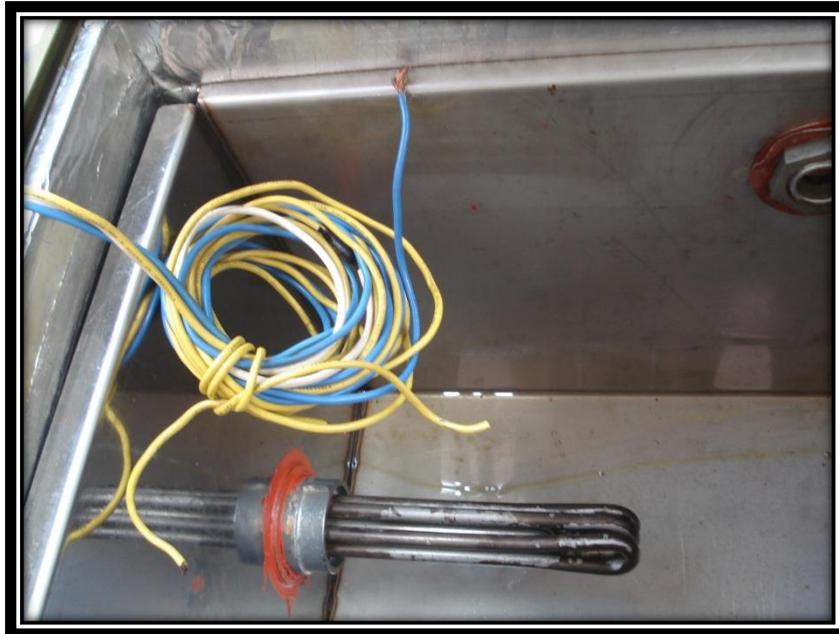
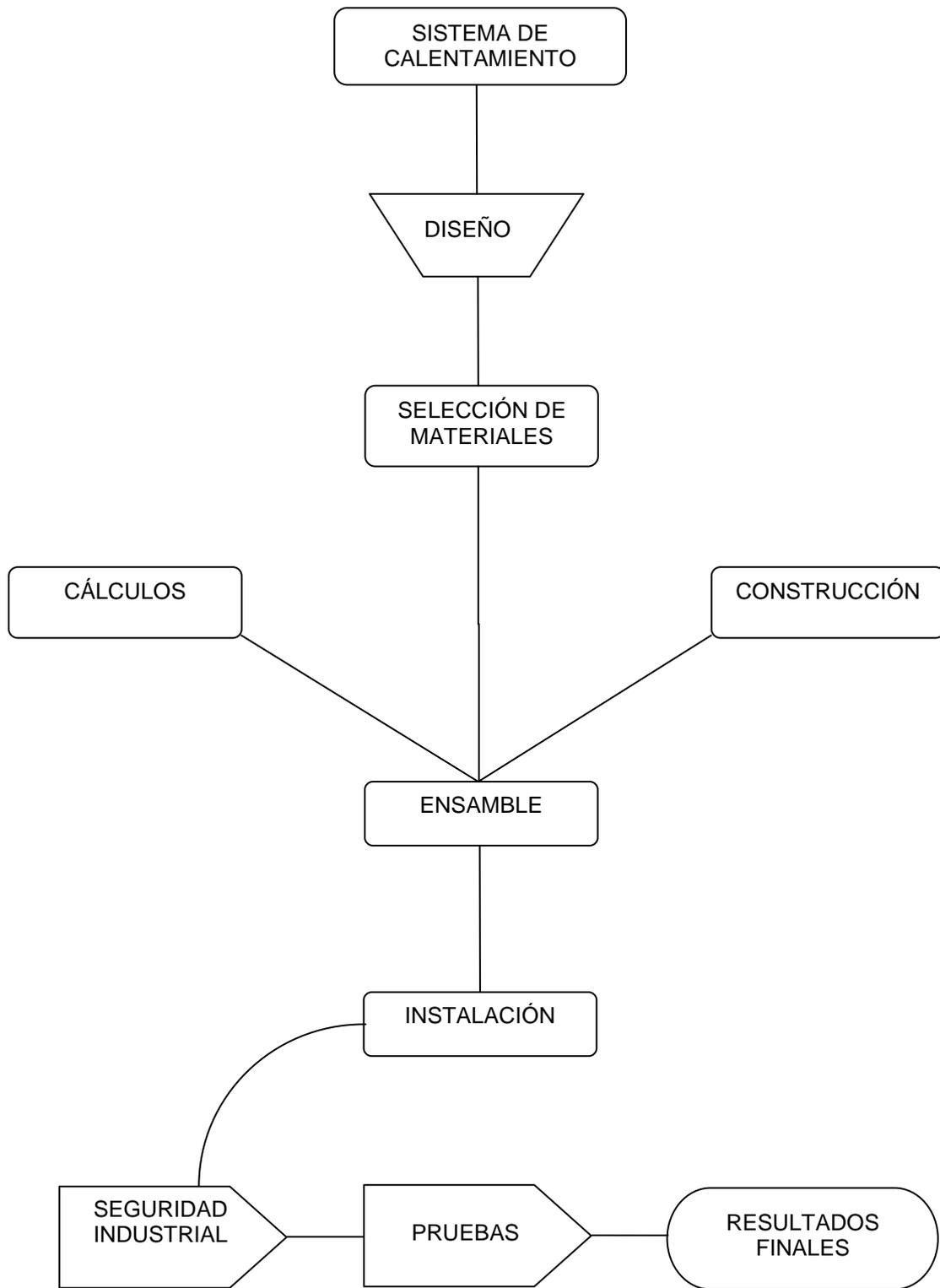


Figura 5.6 Tanque de almacenamiento de aceite, espuma aislante y resistencia eléctrica.



5.4 PROCESO DE INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración proporcionado por el laboratorio de conversión de la energía del DECEM consta de las siguientes partes:

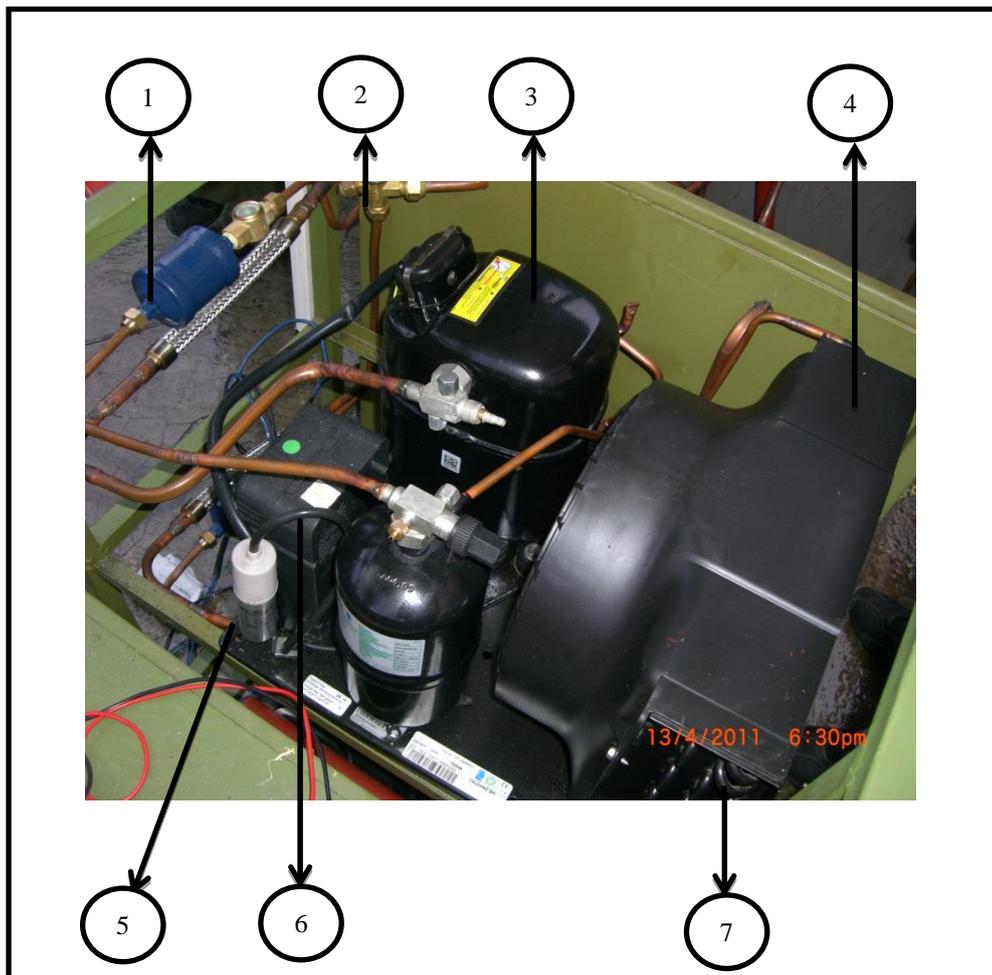


Figura 5.7 Partes de la unidad de refrigeración

1. Filtro y visor de caudal
2. Válvula de expansión
3. Compresor
4. Ventilador
5. Condensador de marcha
6. Caja de conexión
7. Condensador

La bomba centrífuga que lleva el agua los intercambiadores de calor es de 1 Hp con características propias que están definidas anteriormente en el Capítulo 2.

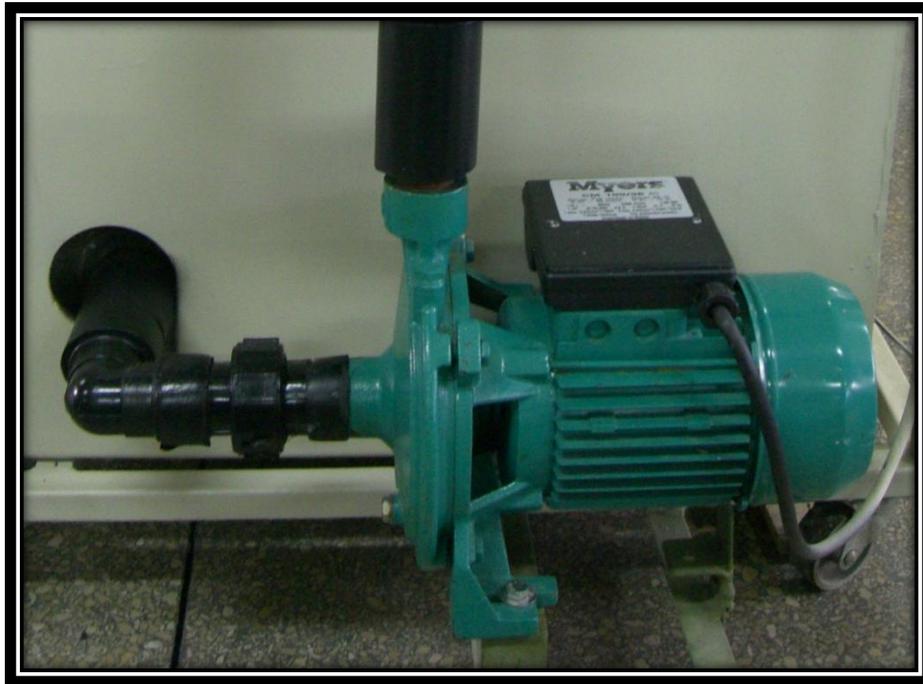
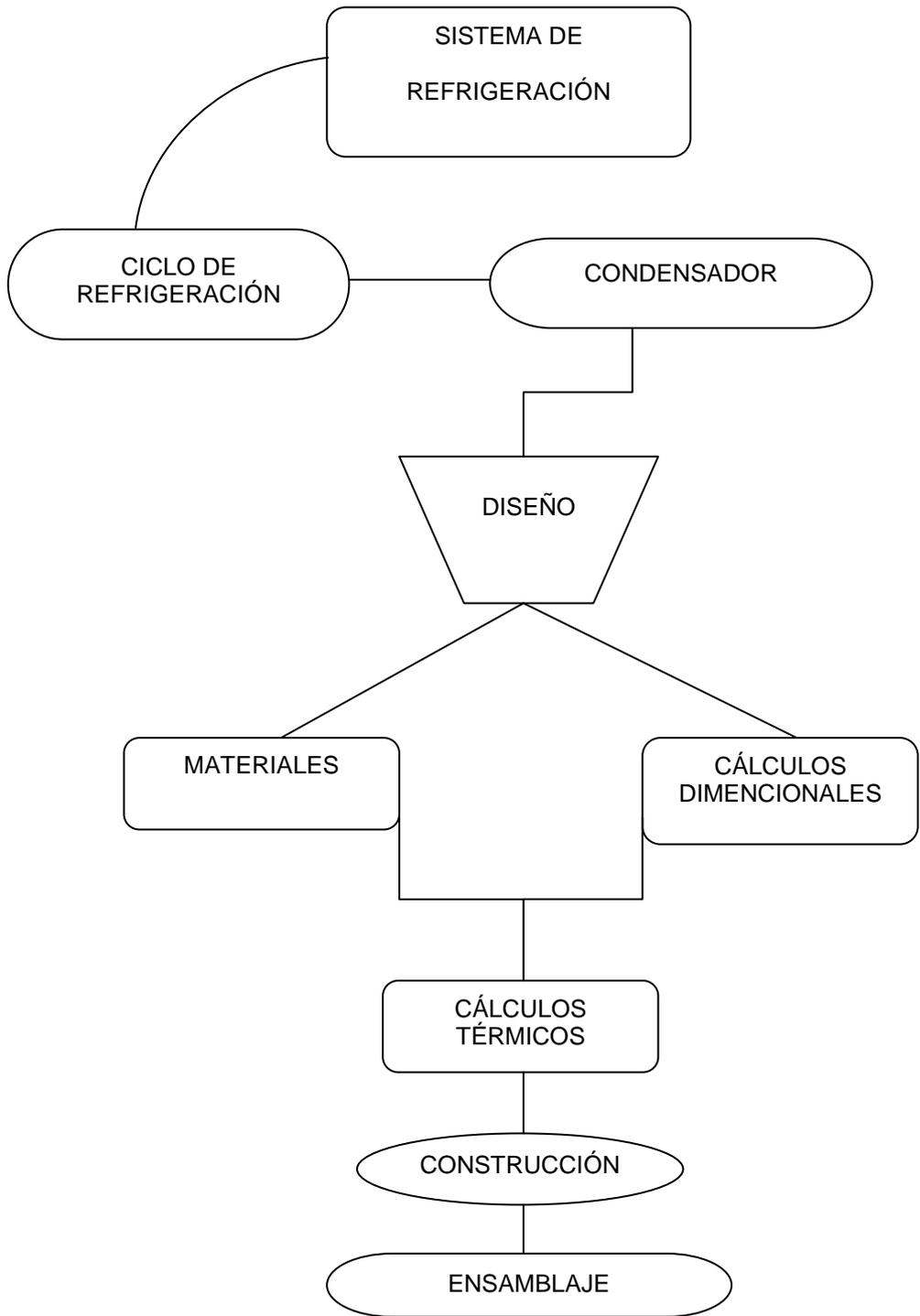


Figura 5.8 Bomba centrífuga y conexiones del sistema de refrigeración



5.5 PROCESO DE INSTALACIÓN DE LAS TUBERÍAS

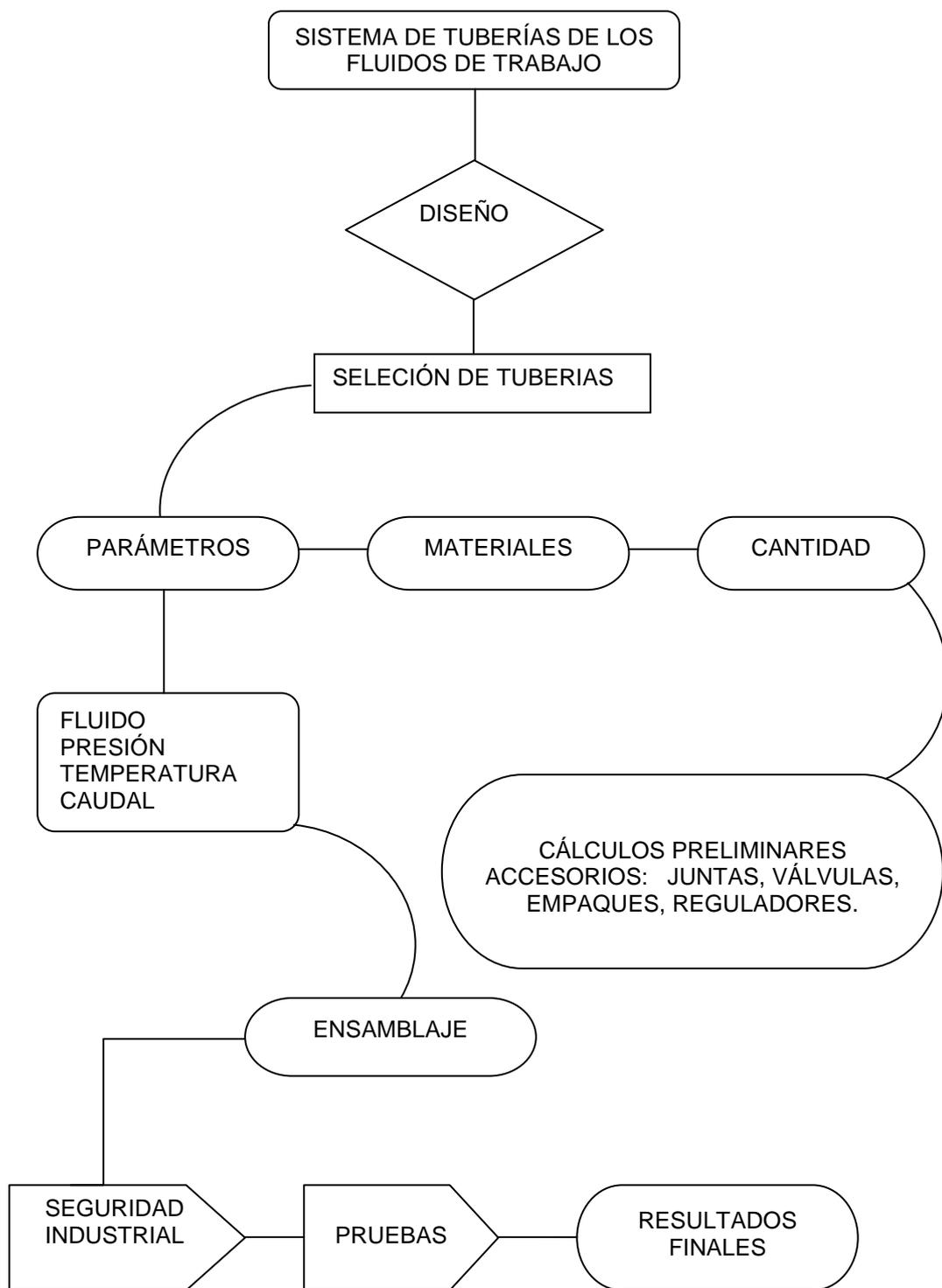
Para la instalación de tuberías se debe tener mucho cuidado con respecto a su instalación ya que esto depende que no haya pérdidas de presión ni fugas en el sistema. Se colocaron todos los acoples y conexiones necesarias para lograr una óptima línea de flujo para los fluidos de trabajo.



Figura 5.9 Instalación de tuberías en el sistema de refrigeración



Figura 5.10 Instalación de tuberías en el sistema de calentamiento

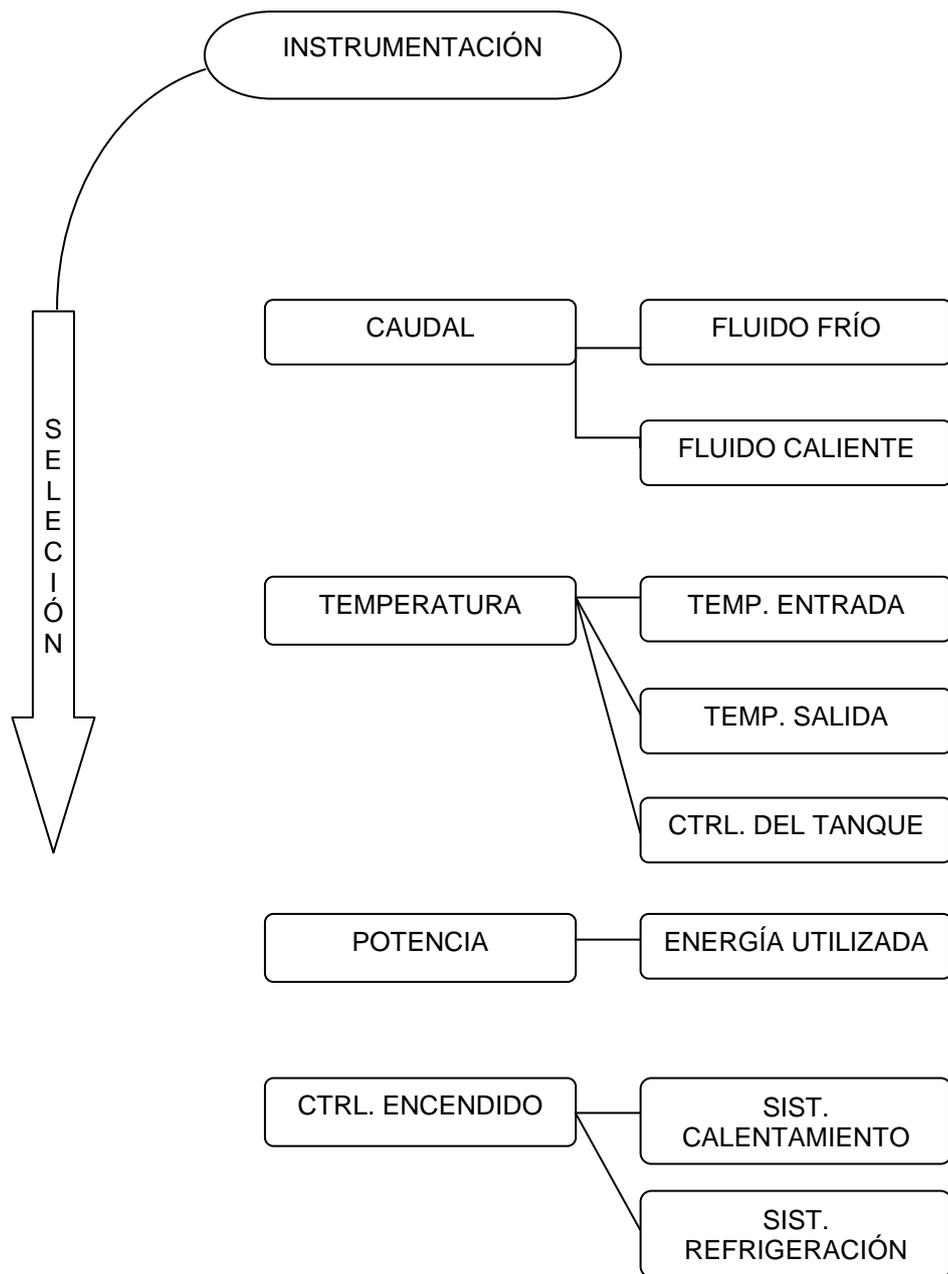


5.6 PROCESO DE MONTAJE DE LA INSTRUMENTACIÓN

Cada uno de los procesos de montaje de instrumentación tiene su propia forma de conectarse en el lugar donde sea fácil la medición del instrumento como se ilustra a continuación.



Figura 5.11 Panel de control de instrumentos para medición del banco de pruebas.



CAPÍTULO 6

PRUEBAS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

6.1 RESULTADOS

Los datos son tomados por medio de un termómetro de 10 entradas que están conectadas a las termocuplas que se encuentran en los tanques de los sistemas de refrigeración y calentamiento además en las entradas y salidas de los intercambiadores de calor para medir las temperaturas.

Los datos de caudal se toman visualmente de los caudalímetros que se encuentran en el tablero y se regula por medio de una válvula que se encuentra en la salida de cada tanque de los sistemas.

Toma de datos

A continuación se muestra los datos tomados en el banco de pruebas donde después de llegar a un equilibrio con las bombas y los sistemas prendidos y que se establezca una temperatura constante en los sistemas en 54 y 5 grados respectivamente, se procede a tomar datos cada ocho minutos las temperaturas serán medidas al mismo tiempo para conocer cuál es la diferencia de temperaturas resultantes en la entrada y salida del fluido frío y el caliente, el medidor de temperatura será colocado en el panel y las termocuplas tienen que ser conectadas en el mismo equipo el cual da una lectura rápida y confiable al instante requerido.

La tabla 6.1 son los resultados del intercambiador concéntrico flujo paralelo los acoples rápidos permiten de una manera sencilla el cambio de dirección del flujo para el caso necesario, los flujos máscicos permanecerán constantes para ambos fluidos y se realizarán 6 mediciones para llegar a tener un resultado óptimo dentro del tiempo para realizar normalmente una práctica de laboratorio.

En la tabla 6.2 se tiene los datos de temperatura para el caso de contra flujo.

La nomenclatura usada para esta práctica y para todos los casos es:

- Thi = Temperatura de entrada fluido caliente (Aceite)
 Tho = Temperatura de salida fluido caliente (Aceite)
 Tci = Temperatura de entrada fluido frío (Agua)
 Tco = Temperatura de salida fluido frío (Agua)
 mh = flujo másico caliente (Aceite)
 mc = flujo másico frío (Agua)

Tabla 6.1 Resultados de la práctica intercambiador concéntrico flujo paralelo.

Tubo y Coraza concéntrico flujo paralelo.							
#	ADQUISICIÓN DE DATOS				Flujo Másico kg/seg>	Tiempo. (min)	
	Temperatura °C						
	Thi	Tho	Tci	Tco	mh	mc	t
1	54,1	53,5	5,1	5,2	0,3	0,65	8
2	54	53,3	5,1	5,3	0,3	0,65	8
3	53,9	53,2	4,9	5,1	0,3	0,65	8
4	54,1	53,7	5	5,1	0,3	0,65	8
5	53,9	53,2	5,1	5,2	0,3	0,65	8
6	54,1	53,6	5	5,2	0,3	0,65	8

Tabla 6.2 Resultados de la práctica intercambiador concéntrico contraflujo.

Tubo y Coraza concéntrico contra flujo.							
#	ADQUISICIÓN DE DATOS				Flujo Másico kg/seg>	Tiempo. (min)	
	Temperatura °C						
	Thi	Tho	Tci	Tco	mh	mc	t
1	54,2	53,4	5	5,3	0,3	0,65	8
2	54	53,5	5	5,2	0,3	0,65	8
3	53,9	53,3	5	5,2	0,3	0,65	8
4	54	53,7	4,9	5,1	0,3	0,65	8
5	54,3	53,3	5	5,2	0,3	0,65	8
6	54,4	53,5	5,1	5,2	0,3	0,65	8

En la tabla 6.3 se tomaron los datos de intercambiador de calor multitubo en flujo paralelo hay que tener en cuenta que en el cambio de tubos puede caer un poco de aceite y agua en el tablero. En la tabla 6.4 se tomaron los datos para el intercambiador de calor multitubo para contra flujo.

Se utiliza la misma nomenclatura que para el caso anterior de intercambiador de calor tubo concéntrico y de igual manera cada ocho minutos después que se llegue a una temperatura estable en el sistema.

Tabla 6.3 Resultados de la práctica intercambiador multitubo flujo paralelo.

Tubos y Coraza 4 Tubos flujo paralelo							
	ADQUISICIÓN DE DATOS						
	Temperatura °C				Flujo Másico kg/seg>		Tiempo. (min)
#	Thi	Tho	Tci	Tco	mh	mc	t
1	54	52,4	5	5,4	0,3	0,65	8
2	54,1	52,4	5,3	5,6	0,3	0,65	8
3	54	52,3	5	5,6	0,3	0,65	8
4	54	52,5	5	5,4	0,3	0,65	8
5	54,2	52,1	5,1	5,7	0,3	065	8
6	54,1	52,3	5,2	5,8	0,3	0,65	8

Tabla 6.4 Resultados de la práctica intercambiador multitubo contraflujo.

Tubos y Coraza 4 Tubos contra flujo.							
	ADQUISICIÓN DE DATOS						
	Temperatura °C				Flujo Másico kg/seg>		Tiempo. (min)
#	Thi	Tho	Tci	Tco	mh	mc	t
1	54	52,3	5	5,5	0,3	0,65	8
2	54	52,2	5,2	5,5	0,3	0,65	8
3	54,3	52,2	5	5,5	0,3	0,65	8
4	54	52,2	5	5,4	0,3	0,65	8
5	54,2	52,2	5,2	5,6	0,3	0,65	8
6	54	52,3	5,2	5,7	0,3	0,65	8

6.2 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Tubo y Coraza concéntrico flujo paralelo

En la tabla 6.5 se imprimen los resultados de los cálculos usando las fórmulas indicadas en el Capítulo 3, donde el resultado en el Calor entregado entre los fluidos, se ha sacado un Q_m . (calor medio) el cual refleja un promedio para realizar las respectivas comparaciones, Q_h . y Q_c . tienen que ser iguales pero se ve una importante diferencia en las medidas y cálculos representadas en la tabla, estas diferencias se producen por la suma de errores en el proceso además de la instrumentación y anexos como termocuplas y conexiones auxiliares, por esta razón es muy importante conocer los resultados e interpretarlos de acuerdo a la ingeniería del cálculo.

En la tabla 6.6 se muestra los resultados de los cálculos para el intercambiador tubo coraza concéntrico para contra flujo. Y para todos los casos se utilizara la siguiente nomenclatura:

Q_h	=	Calor transferido por el fluido caliente (Aceite)
Q_c	=	Calor transferido por el fluido frío (Agua)
Q_m	=	Calor transferido medio
DMLT	=	Diferencia media logarítmica de temperatura
Re_i	=	Número Reynolds fluido caliente (Aceite)
Re_o	=	Número Reynolds fluido frío (Agua)
f	=	Factor de fricción
Nu_o	=	Número de Nusselt (Agua)
Nu_i	=	Número de Nusselt (Aceite)
h_o	=	Coeficiente de transferencia de calor (Agua)
h_i	=	Coeficiente de transferencia de calor (Aceite)
U_o	=	Coeficiente global de transferencia de calor analítico
U_{ex}	=	Coeficiente global de transferencia de calor experimental

Tabla 6.5 Tabulación de todos los parámetros y resultados del intercambiador de calor tubo coraza concéntrico en flujo paralelo.

TABULACIÓN DE RESULTADOS							
#	Qh	Qc	Qm	DMLT	Rei	Reo	f
1	450,00	272,87	361,44	48,65	10,11	3.182,07	0,04
2	525,00	545,74	535,37	48,45	10,11	3.182,07	0,04
3	525,00	545,74	535,37	48,55	10,11	3.182,07	0,04
4	300,00	272,87	286,43	48,85	10,11	3.182,07	0,04
5	525,00	272,87	398,93	48,40	10,11	3.182,07	0,04
6	375,00	545,74	460,37	48,75	10,11	3.182,07	0,04
	Nuo	Nui	ho	hi	Uo	Uex	% Error
1	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	167,19	15,88
2	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	248,67	24,61
3	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	248,16	24,61
4	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	131,95	33,33
5	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	185,49	7,15
6	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	212,51	7,15

Qm es el valor promedio medio entre Qc y Qh y los resultados del % de Error se calculan con los valores de Qc, Qh y Qm. Donde. De la manera que se muestra a continuación.

$$X_i = (Qm1+Qm2+Qm3+Qm4+Qm5+QM6) / 6$$

$$Qm = 530 \text{ W}$$

Ejemplo de cálculo de error

$$Qm1 = 361.44 \text{ W}$$

$$\text{Error absoluto} = Qm1 - Qm = - 68,21$$

$$\text{Error relativo} = (\text{Error absoluto}) / Qm = 0.158$$

$$\text{Error total} = (1 - e1) \times (1 - e2) \times (1 - e3) \times (1 - e4) \times (1 - e5) \times (1 - e5) \times (1 - e6)$$

$$\text{Error total} = 0,27$$

$$\text{Error de resultados} = (1 - \text{Error total}) = (1 - 0,27) = 0,73$$

$$\text{Error de resultados} = 73\%$$

Para los resultados de la tabla 6.5 y 6.6 se encuentra una diferencia ya que el intercambiador de calor al estar en contraflujo incrementa la transferencia de calor a diferencia que en paralelo para definir estos valores se denota en el DMLT de cada una de las mediciones, es necesario observar que la instrumentación esté en buen estado y trabajando correctamente ya que una mala instalación en el equipo podría generar errores mucho mayores a los actuales, a continuación se muestra la tabla de resultados para I.C. tubo coraza concéntrico en contra flujo.

Tubo y Coraza concéntrico contra flujo

Tabla 6.6 Tabulación de todos los parámetros y resultados del intercambiador de calor tubo coraza concéntrico en contraflujo.

TABULACIÓN DE RESULTADOS							
#	Qh	Qc	Qm	DMLT	Rei	Reo	f
1	600,00	818,61	709,31	48,65	10,11	3.182,07	0,04
2	375,00	545,74	460,37	48,65	10,11	3.182,07	0,04
3	450,00	545,74	497,87	48,50	10,11	3.182,07	0,04
4	225,00	545,74	385,37	48,85	10,11	3.182,07	0,04
5	750,00	545,74	647,87	48,70	10,11	3.182,07	0,04
6	675,00	272,87	473,94	48,80	10,11	3.182,07	0,04
	Nuo	Nui	ho	hi	Uo	Uex	% Error
1	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	328,10	34,05
2	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	212,95	12,97
3	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	231,01	5,90
4	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	177,53	27,16
5	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	299,38	22,44
6	100,80	4,36	512,85	195,16	150,95	218,56	10,42

Qm = 530 W

Error de resultados = 74%

Se reconoce que el coeficiente global de transferencia de calor experimental con respecto al teórico tiene una diferencia importante, esta diferencia se da ya que los intercambiadores de calor usados para la práctica tienen una eficiencia muy baja a lo que se podría mejorar con ayuda de deflectores o distribuidores de flujo para generar un campo uniforme para que se aproveche la convección entre los fluidos calo portadores de una mejor manera. Los valores de porcentaje de error se los evalúa comparando los coeficientes globales de transferencia el experimental con el teórico. A continuación se imprimen los valores para el intercambiador tubo coraza multitubo, usando la misma nomenclatura que para el caso anterior.

Tubos y Coraza 4 Tubos flujo paralelo

En la tabla 6.7 se imprimen los resultados de los cálculos usando las fórmulas indicadas en el Capítulo 3 donde el resultado en el Calor entregado entre los fluidos, de donde se ha sacado un Q_m . (calor medio) el cual refleja un promedio para realizar las respectivas comparaciones, Q_h . y Q_c . tienen que ser iguales pero se ve una importante diferencia en las medidas y cálculos representadas en la tabla, estas diferencias se producen por la suma de errores en el proceso además de la instrumentación y anexos como termocuplas y conexiones auxiliares, por esta razón es muy importante conocer los resultados e interpretarlos de acuerdo a la ingeniería del cálculo.

En la tabla 6.8 se muestra los resultados de los cálculos para el intercambiador tubo coraza multitubos para contra flujo. Y para todos los casos se utilizara la siguiente nomenclatura:

Q_h	=	Calor transferido por el fluido caliente (Aceite)
Q_c	=	Calor transferido por el fluido frío (Agua)
Q_m	=	Calor transferido medio
DMLT	=	Diferencia media logarítmica de temperatura
Re_i	=	Número Reynolds fluido caliente (Aceite)
Re_o	=	Número Reynolds fluido frío (Agua)
f	=	Factor de fricción
Nu_o	=	Número de Nusselt (Agua)

- Nui = Número de Nusselt (Aceite)
 ho = Coeficiente de transferencia de calor (Agua)
 hi = Coeficiente de transferencia de calor (Aceite)
 Uo = Coeficiente global de transferencia de calor analítico
 Uex = Coeficiente global de transferencia de calor experimental

Tabla 6.7 Tabulación de todos los parámetros y resultados del intercambiador de calor tubo coraza multitubo en flujo paralelo.

TABULACIÓN DE RESULTADOS							
#	Qh	Qc	Qm	DMLT	Rei	Reo	f
1	1.200,0	1.087,06	1.143,53	47,99	4,68	3.251,15	0,04
2	1.275,0	815,30	1.045,15	47,79	4,68	3.251,15	0,04
3	1.275,0	1.630,59	1.452,80	47,84	4,68	3.251,15	0,04
4	1.125,0	1.087,06	1.106,03	48,04	4,68	3.251,15	0,04
5	1.575,0	1.630,59	1.602,80	47,74	4,68	3.251,15	0,04
6	1.350,0	1.630,59	1.490,30	47,69	4,68	3.251,15	0,04
	Nuo	Nui	ho	hi	Uo	Uex	% Error
1	57,80	4,36	305,04	361,62	696,78	621,77	12,49
2	57,80	4,36	305,04	361,62	696,78	570,66	20,02
3	57,80	4,36	305,04	361,62	696,78	792,44	11,17
4	57,80	4,36	305,04	361,62	696,78	600,75	15,36
5	57,80	4,36	305,04	361,62	696,78	876,16	22,65
6	57,80	4,36	305,04	361,62	696,78	815,47	14,04

Qm = 1307 W

Error total = 65%

Se encuentran diferencias con respecto a los cálculos de intercambiador de calor concéntrico con incremento en los valores de coeficiente global de transferencia de calor esta diferencia se da ya que se ha incrementado el área de transferencia de calor por tener 4 tubos y los porcentajes de error son menores ya que la distribución del flujo ayuda a mantener una transferencia uniforme y una mejor distribución de la masa dentro del intercambiador de calor para ambos fluidos calo

portadores. Para los valores en la siguiente tabla 6.8 se encontrara aumento de calor ya que al estar en contraflujo se incrementa la diferencia media logarítmica de temperaturas incurriendo al aumento de calor para este caso.

A continuación la impresión de los valores de cálculo para el intercambiador de calor tubo coraza multitubo para contra flujo.

Tubos y Coraza 4 Tubos contra flujo

Tabla 6.8 Tabulación de todos los parámetros y resultados del intercambiador de calor tubo coraza multitubo en contraflujo.

TABULACIÓN DE RESULTADOS							
#	Qh	Qc	Qm	DMLT	Rei	Reo	f
1	1.275,0	1.364,35	1.319,68	47,90	4,68	3.572,83	0,04
2	1.350,0	818,61	1.084,31	47,75	4,68	3.572,83	0,04
3	1.575,0	1.364,35	1.469,68	48,00	4,68	3.572,83	0,04
4	1.350,0	1.091,48	1.220,74	47,90	4,68	3.572,83	0,04
5	1.500,0	1.091,48	1.295,74	47,80	4,68	3.572,83	0,04
6	1.275,0	1.364,35	1.319,68	47,70	4,68	3.572,83	0,04
	Nuo	Nui	ho	hi	Uo	Uex	% Error
1	72,66	4,36	1.490,30	361,62	319,14	179,74	43,68
2	72,66	4,36	1.490,30	361,62	319,14	148,15	53,58
3	72,66	4,36	1.490,30	361,62	319,14	199,77	37,40
4	72,66	4,36	1.490,30	361,62	319,14	166,27	47,90
5	72,66	4,36	1.490,30	361,62	319,14	176,86	44,58
6	72,66	4,36	1.490,30	361,62	319,14	180,50	43,44

$$Q_m = 1285 \text{ W}$$

$$\text{Error total} = 97 \%$$

En los resultados anteriores podemos ver una diferencia entre los valores de calor, estos deben ser iguales pero a diferencia de los cálculos para el intercambiador de calor tubo coraza concéntrico, en este caso son muy parecidos esto se da ya que existe un incremento en el coeficiente global de transferencia y en el área de transferencia de calor.

Luego de tener los valores del calor trasferido se puede determinar la eficiencia de los intercambiadores de calor como se muestra a continuación.

6.3 Determinación de la eficiencia de los intercambiadores de calor

La determinación de la eficiencia de los I.C depende directamente de los resultados obtenidos por transferencia de calor donde las principales variables son: tamaño de los tubos, arreglo, su diámetro y material. Para la determinación de la eficiencia se tomó en cuenta ciertos parámetros mostrados a continuación:

- Temperatura que requiere el sistema de calentamiento es de aceite a 60°C, después de llegar a esta temperatura en el tanque las pérdidas generadas por convección y conducción con el aire a temperatura ambiente y el aceite que fluye por los tubos reducen la temperatura del aceite en aproximadamente 5 °C hasta llegar al intercambiador de calor.
- Temperatura que requiere el sistema de refrigeración es de agua a 2°C, después de transportar por medio del sistema de circulación a los intercambiadores de calor y llegar a un equilibrio, se encuentra en 5°C.
- Para los intercambiadores de calor tubo concéntrico y multitubos se requiere el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor U_o en $(W/m^2 \cdot K)$, para encontrar el calor máximo que puede ser removido del fluido.

La eficiencia es el rendimiento fraccional de los intercambiadores de calor, dando una razón de cantidad de calor removido de un flujo a la máxima que puede ser removida. La cantidad de calor removida del flujo se lo toma de la adquisición de datos los mismos que fueron obtenidos con las mismas condiciones térmicas para el cálculo del calor máximo que puede ser removido¹¹.

$Q \text{ Máx.} = \text{caudal másico} \times \text{poder calorífico} \times \text{máx. diferencia de temperatura.}$

¹¹DONALD Q. KERN, Procesos de transferencia de calor, Traducido del inglés por Nicolás Marino, 1era edición, Compañía Editorial Universal, México 1965, p208.

Para el intercambiador tubo coraza concéntrico

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{Cantidad de calor removido al flujo}}{\text{Máxima cantidad de calor que puede ser removido}}$$
$$\text{eficiencia} = \frac{530 \text{ W}}{127400 \text{ W}} \times 100$$
$$\varepsilon = 0.42 \%$$

Para el intercambiador tubo coraza multitubos

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{Cantidad de calor removido al flujo}}{\text{Máxima cantidad de calor que puede ser removido}}$$
$$\text{eficiencia} = \frac{1285 \text{ W}}{127400 \text{ W}}$$
$$\varepsilon = 1.01\%$$

6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

I.C. Tubo Coraza concéntrico

Una vez adquirido los datos se realiza las comparaciones de error y diferencias entre resultados de la práctica con los obtenidos analíticamente y los resultados por el método computacional ANSYS en este caso tenemos errores dentro del 40% donde se concluye que el banco de pruebas da resultados cercanos a los experimentales.

I.C. Tubo Coraza multitubo (4)

Para el caso del intercambiador tubo coraza 4 tubos se tiene un incremento en el área de transferencia, razón por la cual se incrementa el flujo de calor y la diferencia de temperaturas son mayores comparado con el de un solo tubo.

Para el caso del intercambiador multitubo se presenta una diferencia al usar los fluidos de trabajo en contra flujo y flujo paralelo donde se puede observar claramente que existe mayor transferencia de calor para el caso contra flujo, además al aumentar el caudal aumenta el flujo de calor.

Análisis de comparación por error entre los métodos de medición para los intercambiadores de calor.

Los resultados que fueron tomados directamente de la instrumentación en los I.C, los rangos de apreciación establecidos por los instrumentos de medición son de una décima de precisión. Para realizar la comparación en función de las temperaturas en conjunto se usa el calor para comparar los resultados de los tres diferentes métodos de obtención de resultados con fórmulas de error.

Tabla 6.9 Condiciones generales para el análisis de resultados del I.C

Condiciones Generales			
Calor específico		Flujo másico	
Cpc (J/Kg°K)	Cph (J/Kg°K)	mc (Kg/s)	mh(Kg/s)
4198	2500	0.65	0.30

Tabla 6.10 Tabulación de resultados mediante los métodos de cálculos

Datos Temp. (°C)											
Experimentales				Analíticos				ANSYS			
Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco	Thi	Tho	Tci	Tco
54	54,2	5	5,2	54	54,3	5	5,07	54	50,45	5	7.5

Esquema I.C. Tubo concéntrico



Comparación de datos entre analíticos y experimentales

El calor experimental $Q = 530 \text{ W}$ El calor analítico $Q = 255 \text{ W}$

Donde el error es igual a:

$$\text{error} = \frac{Q_{\text{experimental}} - Q_{\text{analítico}}}{Q_{\text{experimental}}} \times 100$$
$$\% \text{ error} = 51.8 \%$$

Error total = (1- Error de resultados) x (1- error)

Error total = (1- 0.73) x (1- 0.518) = 0.13

Error total = (1-0.13) x 100 = 87 %

Comparación de datos entre analíticos y ANSYS

El calor experimental $Q = 530 \text{ W}$ El calor analítico $Q = 734 \text{ W}$

Donde el error es igual a:

$$\% \text{ error} = \frac{Q_{\text{experimental}} - Q_{\text{ANSYS}}}{Q_{\text{experimental}}} \times 100$$
$$\text{error} = 38.5 \%$$

Error total = (1- Error de resultados) x (1- error)

Error total = (1- 0.73) x (1- 0.385) = 0.166

Error total = (1-0.166) x 100 = 83.4 %

De esta manera se concluye que el método ANSYS es el que más se acerca a los resultados reales ya que tiene un menor porcentaje de error que el método analítico, y estos dependen directamente del error que se pueda producir por medición o cálculo. En el cálculo de los intercambiadores de calor se tienen eficiencias muy bajas ya que los intercambiadores para ser usados en la práctica modelo del banco de pruebas fueron construidos con requerimientos básicos esto

quiere decir dimensiones mínimas y diámetros de los tubos que se consiguieron en el mercado actual, lo cual esta sujeto a marcar bajas diferencias de temperaturas si fuera el caso a calcular por esta razón la diferencia de temperaturas varía en un rango de 0.3 a 3 grados centígrados dependiendo del flujo másico y las perdidas de calor generadas en el sistema de circulación, para cálculo de diferencias mas grandes de temperatura los intercambiadores de calor pueden mejorar su eficiencia y rendimiento e inclusive la transferencia de calor incrementando el número de tubos reduciendo el diámetro de la coraza o a su vez aumentando el largo de los tubos.

El uso de deflectores internos ayuda a generar mas turbulencia dentro del intercambiador aumentando el número de Reynolds generando mayor transferencia ya que se estaría mejorando la distribución del flujo a través de toda el área de transferencia, también existe achurados de flujo dentro de los tubos internos en forma espiral para que el fluido gire en el tubo mejorando la distribución del mismo.

También es importante reconocer los materiales de los intercambiadores de calor ya que el coeficiente global de transferencia de calor depende directamente de las constantes térmicas de cada componente. Otro de los motivos de reducción de la eficiencia térmica es el tipo de fluido a ser calculado, como es este el caso de aceite – agua, que a comparación de agua – a gua es mucho menor.

Análisis general del Banco de Pruebas y sus componentes

Intercambiadores de calor (tubo concéntrico y multitubo)



Figura 6.1 Intercambiadores de calor

Tubo concéntrico:

El intercambiador de calor tubo concéntrico cuenta con un tubo interno de 34.5 mm de diámetro y 410 mm de longitud el cual está ubicado dentro de la coraza de 115 mm de diámetro que consta con dos tapas montables, aislamiento térmico. En las entradas de las tapas ingresa y sale el fluido caliente (Aceite) mientras que en las otras entradas del intercambiador son de ingreso y salida del fluido frío (agua).

Multitubo:

El intercambiador de calor multitubo cuenta con 4 tubos en arreglo cuadrado de 656 mm de longitud dentro de la coraza y dos tapas fijas a los extremos. Cada tubo tiene un diámetro de 18 mm. En este caso el ingreso del fluido caliente (Aceite) ingresa y sale por los costados mientras que el fluido frío lo hace en las entradas y salidas en la parte superior.

Los intercambiadores de calor cuentan con una eficiencia inferior al 1% debido a que los intercambiadores no cuentan en su interior con deflectores y adicionalmente tampoco poseen un mayor número de tubos y longitud de los mismos. Debido a esto es recomendable la adquisición de nuevos intercambiadores de calor para el presente banco de pruebas.

Sistema de refrigeración:



Figura 6.2 Sistema de refrigeración

Para el sistema de refrigeración se utilizó dos unidades de refrigeración (L-Unite Hermetique) las cuales logran enfriar el agua de una temperatura ambiente de

22°C hasta la temperatura deseada de 2°C a través de un evaporador diseñado para enfriar alrededor de 30 galones que están almacenados en el tanque.

Este sistema de refrigeración es de alta eficiencia dado que sus componentes son de la marca de unidades de refrigeración (L-Unite) y aparte de eso el sistema de refrigeración cuenta con dos evaporadores de forma de serpentín los cuales logran enfriar el agua en un menor tiempo posible.

Para las mediciones de temperaturas el sistema de refrigeración cuenta con un termómetro digital de temperatura de un grado de apreciación el cual regula la temperatura de agua para conservarla en un rango de 2.5 hasta 5°C.

El calor entregado por el sistema de refrigeración es de 1589 Watts para 1 HP como se indica en la figura siguiente.

PLEASE QUOTE STOCK NUMBER WHEN ORDERING

REALCOLD COMPONENTS

L'UNITE HERMETIQUE

CP3 November 2007

L'UNITE SEALED CONDENSING UNITS

R404A MEDIUM TEMPERATURE Med Temp

220/240 Volt 50 Hz Single Phase

REALCOLD STOCK NO.	MODEL	NOM. HP	DISP. CM ³	WATTS CAPAC. -5°C	APP	DIMENSIONS				PRICE \$ excl GST
						L mm	W mm	H mm	KG	
C9407 ^A	AEZ4425ZHR	1/5	4.50	338	HT	417	317	224	18.5	POA
C9408 ^A	AEZ4430ZHR	1/4	5.70	468	HT	389	330	257	18.5	
C9412 ^A	AEZ4440ZHR	1/3	7.55	624	HT	490	350	292	21	
C9426 ^A	CAE4450ZHR	3/7	9.40	770	HT	490	350	292	22.5	
C9430 ^A	CAE9460Z MHR	1/2	11.30	899	MHT	490	356	292	26	
C9432 ^A	CAE9470Z MHR	1/2	13.30	1156	MHT	490	430	338	32	
C9442 ^A	CAJ9480Z MHR	5/8	15.20	1308	MHT	480	430	338	40	
C9444^A	CAJ9510Z MHR	1	18.30	1589	MHT	486	430	338	41	
C9446 ^A	CAJ9513Z MHR	1 1/8	24.20	1911	MHT	486	430	338	41	
C9448	CAJ4517Z HR	1 1/4	25.95	2437	HT	620	510	450	48	
C9450	CAJ4519Z HR	1 1/2	34.45	3065	HT	620	510	450	48	
C9470	FH4524ZHR	2	43.50	3324	HT	620	510	450	64	
C9473	FHS4531Z HR	2 1/2	56.65	4473	HT	608	628	558	68	
400 Volt 50 Hz Three Phase										
C9471 *	TFH4524Z HR	2	43.50	3324	HT	620	510	450	56	POA
C9475 *	TFHS4531Z HR	2 1/2	56.65	4473	HT	608	628	558	70	
C9477 *	TFHS4540Z HR	3	74.25	5306	HT	608	628	558	75	
C9482 *	TAGS4561Z HR	5	112.50	8336	HT	700	755	660	85	

* Also suitable for R22

Figura 6.3 Capacidad del sistema de refrigeración

Es así que mediante la interacción de todos los elementos se logra obtener un sistema de refrigeración confiable y altamente eficiente para el banco de pruebas.

Sistema de Calentamiento:

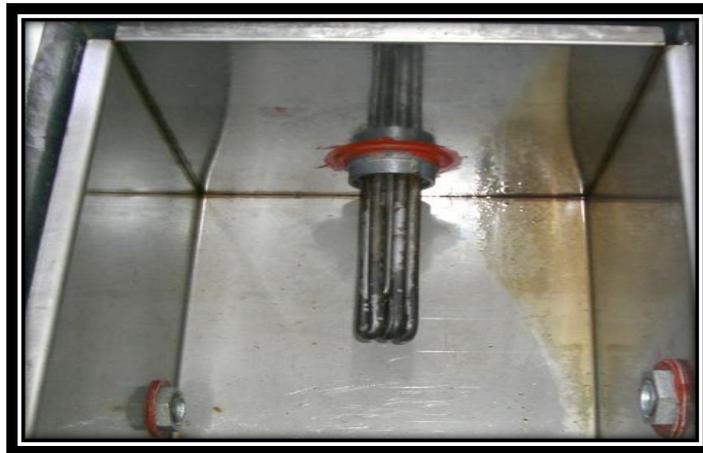


Figura 6.4 Resistencia eléctrica

El sistema de calentamiento requerido para el banco de pruebas cuenta con una resistencia eléctrica de marca WATLOW la cual se encarga de calentar el aceite de una temperatura ambiente de 20°C hasta la temperatura deseada de 60°C, esta resistencia de gran eficiencia puede lograr calentar el aceite hasta una temperatura de 175°C. La resistencia está ubicada en un tanque de almacenamiento de acero inoxidable con capacidad de 17 galones los cuales circulan dentro de los intercambiadores de calor.

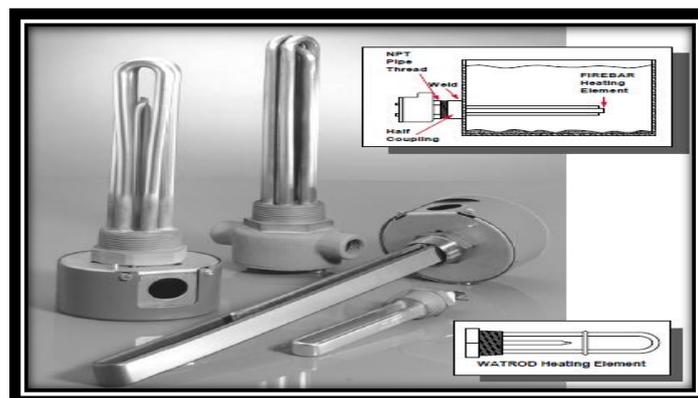


Figura 6.5 Esquema del calentador

En resumen el sistema de calentamiento es muy eficiente ya que cumple con todos los requerimiento para obtener una buena transferencia de calor del aceite y lograr así el objetivo de calentar el agua y observar el intercambio de calor.

Sistema de circulación:



Figura 6.6 Bomba centrífuga

Para el sistema de circulación se utilizó dos diferentes tipos de bombas, una de $\frac{3}{4}$ de HP marca Myers para la circulación de aceite la cual permite obtener un caudal de hasta 30 litros por minuto para las prácticas con los intercambiadores. De igual manera se utilizó una bomba de 1 Hp marca Myers para la circulación del agua la cual permite obtener un caudal de hasta 50 litros por minuto. La tubería es de tipo PVC diseñada y construida en líneas para su fácil acceso tanto para las bombas como para los intercambiadores.

Se utilizó además un cierto número de acoples y conexiones tales como: codos, acoples universales, acoles tipo T y cada elemento fue montado con su respectivo aislamiento para evitar futuras fugas por el uso del equipo.

Todas las bombas están sub dimensionadas para su uso ya que en los lugares de venta locales estas son las únicas accesibles en el mercado para el caudal requerido. Las bombas están sobre dimensionadas debido a que estas están diseñadas para trabajar a los mismos caudales pero a una mayor diferencia de alturas.

Sistemas Eléctricos e Instrumentación:



Figura 6.7 Breaker y contador

Para los sistemas eléctricos se utilizaron equipos de alta calidad que permiten trabajar con corriente de 220 voltios en el laboratorio. Cada equipo eléctrico lleva su respectiva protección contra alto y bajos de voltaje. Adicionalmente se ha instalado una caja de breakers para controlar la corriente de cada sistema de manera individual.

Para la instrumentación se tomaron en cuenta las siguientes propiedades físicas a ser medidas y controladas en el banco de pruebas: presión, caudal y temperatura. Para la presión se utilizó manómetros tipo burdón que permiten medir presiones de hasta 300 psi con una apreciación de 1PSI. Necesario para llevar un control debido de los sistemas de refrigeración.

Los caudalímetros son tipo de área variable de la serie EZ-VIEW. Estos medidores de caudal permiten medir en un rango de 20 a 100 litros por minuto en el caso del agua y de 4 a 35 litros por minuto en el caso del aceite con una apreciación de 2.5 litros por minuto cada uno. También pueden operar a una presión máxima de 325 psi.



Figura 6.8 Caudalímetro

La siguiente variable a analizarse y la más importante es la temperatura de los fluidos para lo cual se utilizó termocuplas tipo k en las entradas y salidas de los intercambiadores de calor y controles digitales de temperaturas en cada sistema anexo que el banco de pruebas posee. Para la medición en las termocuplas se utilizó un termómetro digital de temperaturas TD-30 disponible en el laboratorio de energía y mecánica el cual nos permite tener una apreciación de 0.1 grados centígrados de temperatura.



Figura 6.9 Medidor de temperatura

Para la medición de la temperatura en los sistemas anexos como el de refrigeración y calentamiento se utilizaron termómetros digitales de serie TC-900ri para el agua y MT-516CVT para el aceite. Cada uno cuenta con una apreciación de 0.1 grados.

Es recomendable para la toma de datos tanto del caudal como de la temperatura, poseer equipos con el mayor rango de apreciación posible, esto permitirá tener un menor rango de error al momento de la toma de datos.

Análisis general del capítulo

Es recomendable que el laboratorio adquiriera un equipo de mayor apreciación de temperatura para que los estudiantes tengan menor rango de error al momento de tomar las mediciones. Las bombas utilizadas en este banco de pruebas fueron sobre dimensionadas debido que fueron adquiridas en el mercado solo con el caudal requerido para el banco de pruebas. Es recomendable realizar un cálculo previo de caudal y potencia de la bomba para estar seguros de adquirir la bomba

con la potencia necesaria y así poder reducir costos de adquisición y mejorar la eficiencia de las bombas, por ser una de las causas principales en los momentos actuales de uso de energía innecesaria.

Para los rotámetros de área variable se concluyó que tienen un rango de apreciación muy bajo en la medición de caudal dado que fueron adquiridos directamente en el mercado internacional para los caudales requeridos. Se recomienda con adquirir nuevos caudalímetro de mayor rango, apreciación y electrónicos, para así tener una mejor toma de datos y realizar toma de datos con mayor precisión.

El sistema de calentamiento diseñado cumplió con las expectativas ya que logro calentar el aceite a las temperaturas requeridas para realizar las pruebas. Se recomienda tener tanto para el sistema de calentamiento como de refrigeración un buen control de mantenimiento ya que al trabajar con fluidos, pueden surgir algunos factores como impurezas que dificultaran la toma de datos.

En la toma de datos de cada propiedad física que interviene se pudo apreciar que están en un margen de error de alrededor del cinco por ciento. Es importante recomendar que para la toma de datos evaluar el rango de error que posee cada instrumento de medición con el fin de compararlo con un valor teórico dado por cálculos y/o simulación por método computacional.

6.5 ELABORACIÓN DE LA GUÍAS PRÁCTICAS

ANEXO J

6.6 MANUAL DE OPERACIÓN

ANEXO K

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico permite determinar los costos de la fabricación del banco de pruebas, con la finalidad de determinar el valor real de la inversión en el trabajo de investigación, para posteriormente determinar los beneficios que se pueden obtener con el funcionamiento del equipo. Para ello se realiza el análisis de los costos directos e indirectos en los que se incurren los mismos que se detallan a continuación:

7.1.1 COSTOS DIRECTOS

Son aquellos costos que se relacionan directamente con el proceso de producción de un bien, en este caso la construcción del banco y se clasifican en costos de materiales para la fabricación y mano de obra que se emplea en la elaboración, los cuales se especifican de la siguiente manera:

Tabla 7.1 Costos de materiales eléctricos

Costos de Materiales Eléctricos			
CONTENIDO	CANT.	VALOR/U	TOTAL
Control de temperatura eléc.	2	60	120
Bobina válvula solenoide	2	26	52
	Total (USD)		172

Tabla 7.2 Costos de materiales base

Costo de materiales base			
CONTENIDO	CANT.	VALOR/U	TOTAL
Tubo cuadrado 1"*2 mm	2	13	26
Tubo cuadrado 1"*1.5 mm	2	11	22
Tol negro 2mm	3	86	258
Acero inoxidable plancha 1.5 mm corr.	1	345	345
Acero inoxidable plancha 1.5 mm	1	285	285
Tubo rígido cobre 1 1/8	2	135	270
Rollo tubería cobre 1/2 pulg.	2	82	164
Rollo tubería cobre 3/8 pulg.	2	60	120
Angulo 1" x 1/8	2	9	18
	Total (USD)		1508

Tabla 7.3 Costos de materiales refrigeración

Costos de Materiales de Refrigeración			
CONTENIDO	CANT.	VALOR/U	TOTAL
Orificio válvula de expansión	2	14	28
Válvula de expansión	2	62	124
Lana de vidrio rígida	2	36	72
Válvula cierre de globo 1/8	4	78	312
Valv. Solenoide 3/8	2	38	76
Filtro secador 3/8	2	10	20
Eliminador de vibración	2	16	32
Cano aislante 1,1/8" x 1/2" x 6'	6	3,8	22,8
Cano aislante 5/8" x 1/2" x 6'	4	2,5	10
Cinta rollo rubatex 2"x 1/8" x 3	1	6,5	6,5
Soldadura de plata	14	5,95	83,3

Fundente de plata	1	3	3
	Total (USD)		789,6

Tabla 7.4 Costos de instrumentación

Costos de Instrumentación			
CONTENIDO	CANT.	VALOR/U	TOTAL
Visor del líquido tuerca 3/8	2	22	44
Caudalímetros	2	180	360
	Total (USD)		404

Tabla 7.5 Costos de fluidos

Costos de Fluidos			
CONTENIDO	CANT.	VALOR/U	TOTAL
Aceite lubricante limpiador	1	20	20
Aceite de trabajo SAE 10 REPSOL	3	102	306
Carga gas nitrógeno	1	200	200
	Total (USD)		526

Tabla 7.6 Costos de accesorios

Costos de Accesorios			
CONTENIDO	CANT.	VALOR/U	TOTAL
Intercambiadores de calor	2	350	700
Resistencia eléctrica 1.5 kw	1	680	680
Bomba de agua 1hp	1	200	200
Bomba de aceite 3/4 hp	1	130	130
	Total (USD)		1710

Tabla 7.7 Costos varios

Costos varios			
CONTENIDO	CANT.	VALOR/U	TOTAL
COMPLEMENTOS VARIOS ANEXOS (teflón, turcas, empaque, uniones, brocas, selladores, herramientas etc.)	1	300	300
Total (USD)			300

Tabla 7.8 Remuneración técnicos especializados

Remuneración técnicos especializados			
Cargo	Tiempo horas	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Técnico Refrigeración	125	20	2500
Técnico soldador	17	15	255
		Total (USD)	2755

Tabla 7.9 Remuneración técnicos

Remuneración Ayudantes			
Cargo	Tiempo horas	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Ayudante	50	4	200
Doblador	10	10	100
Pintor	10	10	100

	Total (USD)	400
--	-------------	-----

7.1.2 COSTOS INDIRECTOS

Son aquellos costos que se encuentran involucrados de alguna manera con la fabricación del banco de pruebas, categorizados como gastos generales no incluidos en los costos directos, los cuales se especifican de la siguiente manera:

Tabla 7.10 Honorarios Director y Codirector

Honorarios Director y Codirector				
Nombre	Cargo	Tiempo horas	Valor hora (USD)	Costo total (USD)
Ing. Ernesto Soria	Director	50	S/C	250
Ing. Freddy Ordoñez	Codirector	50	S/C	250
			Total (USD)	500

Tabla 7.11 Misceláneos

Misceláneos			
CONTENIDO	CANT.	VALOR/U	TOTAL
Transporte	1	100	100
Servicios básicos	1	30	30
Copias	350	0,05	17,5
Impresiones	1800	0,05	90

Otros	1	50	50
	Total (USD)		287,5

7.1.3 GASTOS TOTALES

Tabla 7.12 Gastos totales

CUADRO DE GASTOS TOTALES	
TABLAS CAP. 7	VALOR/U
Costo de Materiales Base	1508
Costos de Materiales Eléctricos	172
Costos de Materiales Refrigeración	789,6
Costos de Instrumentación	404
Costos de Fluidos	526
Costos de Accesorios	1710
Costos varios	300
Remuneración técnicos especializados	2755
Remuneración Ayudantes	400
Honorarios director y codirector	500
Misceláneos	287,5
TOTAL PROYECTO	9352,1

De la deducción de costos realizada anteriormente, se obtiene que el costo total del proyecto es de 9352,1 dólares americanos; lo cual si se relaciona con el costo de adquirir un banco con las mismas características a un valor 25000 dólares

americanos, se puede deducir que la elaboración del banco de pruebas para el laboratorio de Conversión de Energía y Mecánica, genera un aporte positivo para la Escuela Politécnica del Ejército, específicamente a la carrera de Ingeniería Mecánica en vista que los estudiantes que se encuentran cursando las asignaturas en relación al proyecto podrán hacer uso del mismo con el fin de perfeccionar su capacitación; mientras que la escuela con un gasto relativamente bajo va a poder brindar este servicio a los estudiantes.

7.2 ANÁLISIS FINANCIERO

El análisis financiero constituye una técnica que permite determinar los beneficios o pérdidas en que se incurren al realizar una inversión, en donde su objetivo es obtener resultados que apoyen la toma de decisiones referente a la actividad que se emprende; el trabajo de investigación fue financiado por los autores del proyecto, con el auspicio de la Escuela. El proyecto será aporte para la carrera de ingeniería mecánica ya que permitirá realizar prácticas para intercambiadores de calor con fluidos de aceite API y agua complementando el conocimiento de comportamiento de la energía a los estudiantes del DECEM, por lo cual no es factible realizar análisis de la Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor Actual Neto (VAN).

Tabla 7.13 Aporte económico del proyecto

APORTE ECONÓMICO DEL PROYECTO		
NOMBRE	CARGO	APORTE (USD)
Jorge Mejía	Responsable del proyecto	3426,05
Fernando Pérez	Responsable del proyecto	3426,05
Vicerrectorado de	Auspiciante del proyecto	2500

investigación	mano de obra	
	TOTAL APORTE	9352,1

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

1. El Banco de Pruebas contribuye de manera importante para el desarrollo de la investigación con prácticas nuevas para el Laboratorio de Conversión de la Energía.
2. Se pudo observar que los intercambiadores de calor son de baja eficiencia, esto es debido a que el área de transferencia de calor es muy pequeña y los intercambiadores no fueron diseñados bajo normas y regulaciones.
3. Se concluyó que las bombas no dieron el caudal necesario y aparte de eso estuvieron sobredimensionadas para su uso ya que fueron adquiridas directamente en el mercado sin un previo estudio de las mismas.
4. Se observó que existen errores elevados en la toma de datos especialmente en la temperatura esto debido a la apreciación de una décima de grado que existe en los termómetros digitales utilizados.
5. Se pudo detectar las diferencias entre los métodos de resolución y diseño de intercambiadores de calor comparando los resultados entre ellos.
6. Con el fin de disminuir los grados de error en las mediciones, se puede controlar los elementos, cambiarlos o sustituirlos para un mejor rendimiento y eficiencia acordes a las necesidades de la investigación.
7. Con el uso del Banco de Pruebas, los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica no solo podrán hacer prácticas sino también lograrán determinar el

comportamiento de diferentes aceites API con intercambio de calor con el agua.

8. Se encontró un alto grado de error en las mediciones ya que los intercambiadores de calor usados para este Banco de Pruebas tienen una eficiencia muy baja debido a que se ajustaron al presupuesto para este proyecto, siendo esta la causa principal de los problemas del desarrollo de cálculos y adquisición de datos.
9. El proyecto ha sido culminado con éxito y con grandes expectativas ya que fomentará en los estudiantes el conocimiento de los programas informáticos de simulación.
10. Se logró diseñar y construir en su totalidad el Banco de Pruebas para intercambiadores de calor tubo concéntrico y multitubo con fluidos de trabajo agua y aceite API para el laboratorio del DECEM.
11. Para el cálculo de los intercambiadores de calor se comprobó que el método más confiable es el de la simulación por el programa ANSYS esto debido a que al calcular mediante elementos finitos se obtuvo resultados más exactos y con un alto grado de confiabilidad.
12. La utilización de instrumentación en especial medidores digitales facilitó la obtención de datos y el control en el banco de pruebas que cuenta con instrumentación de avanzada tecnología y con un correcto grado de confiabilidad, es necesario que la instrumentación tenga por lo menos una centésima de apreciación
13. La suma de errores de medición de los instrumentos y sus componentes hace que el Banco de Pruebas para intercambiadores de calor tenga porcentajes muy altos alrededor del cincuenta por ciento y claramente esto se debe a que la diferencia de temperaturas son pequeñas ya que la eficiencia de los intercambiadores son muy bajas.

8.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el monitoreo constante de los equipos y partes que componen el banco para que este se mantenga en niveles de operación adecuado.
2. Para que los resultados expuestos tengan mayor precisión se recomienda utilizar instrumentación actualizada acorde al avance de la tecnología, como por ejemplo los caudalímetros al ser mecánicos podrían ser remplazados por medidores de caudal electrónicos.
3. A fin de tener mayor rango de diferencia de temperaturas, en el futuro sería adecuado el uso de intercambiadores con mayores eficiencias para la toma de datos, ya que los expuestos en el banco son muy básicos.
4. Incurrir en el desarrollo de nuevos proyectos como el cálculo de nuevos intercambiadores de calor o automatización de mismo.
5. Se debe tener cuidado con algunos de los componentes ya que podrían causar daños físicos al ponerse en contacto con la persona responsable del laboratorio y leer el manual de usuario antes de su operación.
6. Tener cuidado al momento de la operación del equipo con los fluidos de trabajado en especial con el aceite ya que al estar a altas temperaturas puede ser su uso peligroso.
7. Se deberá incentivar a los estudiantes a que realicen proyectos nuevos, con el fin de dotar a los laboratorios del DECEM de equipos de prácticas, esto lograría que las futuras generaciones cuenten con mayores opciones de aprendizaje.
8. Se recomienda adquirir intercambiadores de calor que estén diseñados bajo normas específicas y si el caso no le permitiese por lo menos se debería abrir los intercambiadores e instalar deflectores con el objetivo de aumentar la transferencia de calor.

9. Se recomienda cambiar la bomba de aceite con el objetivo de tener un mayor caudal de fluido caliente en el banco de pruebas, si se tiene un mayor caudal habrá un mayor número de Reynolds un mayor Nusselt y por lo tanto una mayor transferencia de calor de la ya existente.
10. Es recomendable que el laboratorio de energía del DECEM adquiera un termómetro digital que tenga un mayor rango de apreciación superior al de una décima de grado, ya que en las prácticas al tener una diferencia de temperaturas menor que la de un grado resulta difícil reducir el error de apreciación de temperaturas.
11. Es recomendable realizar un estudio de cálculo de la bomba de aceite y de agua antes de su adquisición esto permitirá trabajar con caudales mayores y así tendrá mejores resultados en la transferencia de calor.
12. Es necesario optar por métodos alternativos a los clásicos de análisis como por ejemplo simulación con programas nuevos e innovadores que permitan al estudiante aprender el comportamiento y el análisis por un método computacional.
13. Es recomendable tener un buen mantenimiento preventivo en el Banco de Pruebas para que en las prácticas de laboratorio los resultados tengan una mayor precisión con el fin de reducir el margen de error.

8.3 BIBLIOGRAFÍA

1. INCROPERA F. y De WITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, Traducido del inglés por Cruz Ricardo, 4ta. Edición, Prentice Hall, México 1999,
2. YUNUS A. ÇENGEL, Transferencia de calor y masa, Traducido del inglés por José Hernán Pérez, 3ra Edición, McGraw-Hill, México 2007.
3. DONALD Q. KERN, Procesos de transferencia de calor, Traducido del inglés por Nicolás Marino, 1era edición, Compañía Editorial Universal, México 1965.
4. ROY J. DOSSAT, Principios de refrigeración, traducido del inglés por Armando Garza Cárdenas, 1era edición, Compañía Editorial Universal, México 1986.

Páginas web de consulta periodo de investigación Ene – May 2011

1. <http://www.radiadoresgallardo.cl/topintercambiaadres.pdf>
2. http://www.unioviedo.es/TBR/archives/IBQ%202011/8%20Pedro%20Gonz%20E11ez%20Men%20E9ndez/8.4/PDF/DEI_07_comp.pdf
3. http://www.sedical.com/web/productos.aspx?CAT_ID=29
4. http://www.thermoequipos.com.ve/mostrar_tips.php?IdT=5
5. http://www.ternamic.com/productos.asp?id_cat=02
6. <http://www.tecnicalacero.com/fotostda/fotos%20fabricacion/fabinter1>
7. http://www.omaaragon.org/riesgos/ficheros/_3514.pdf
8. http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/ap07_ciclos_termicos.ph
9. <http://www.monografias.com/trabajos11/presi/presi.shtml>
10. <http://www.maquinariapro.com/maquinas/manometro.html>
11. <http://www.fisicarecreativa.com/guias/sensorestemp.pdf>
12. http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo_03/termocupla
13. <http://members.fortunecity.es/100pies/Lubricantes/lubricantes2.htm>
14. http://www.deere.com/es_MX/ag/homepage/tips/clasificacion_aceites.html
15. <http://www.scribd.com/doc/17091619/disenio-y-calculo-de-intercambiadores>
16. http://www.software-gg.com/pv_intercambiadores.htm
17. ANSYS 13 workbench 2.0 version: 13.0.0 © 2010 SAS IP, INC. All right reserved. Help and support
18. http://www.realcold.co.nz/media/documents/pdf/capital_plant/LUnite%20Sealed%20Condensing%20Units.pdf

ANEXOS

ANEXO A
PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL AGUA
(INCROPERA)

Tabla A.6 Propiedades termofísicas de agua saturada^a

Temperatura, T (K)	Presión, P (bars) ^b	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpía de vaporización, h _{fg} (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg · K)		Viscosidad (N · s/m ²)		Conductividad térmica (W/m · K)		Número de Prandtl		Tensión superficial, σ _s · 10 ³ (N/m)	Coeficiente de expansión, β _f · 10 ⁶ (K ⁻¹)	Temperatura T (K)
		v _f · 10 ³	v _g		c _{p,f}	c _{p,g}	μ _f · 10 ⁶	μ _g · 10 ⁶	k _f · 10 ³	k _g · 10 ³	Pr _f	Pr _g			
273.15	0.00611	1.000	206.3	2502	4.217	1.854	1750	8.02	569	18.2	12.99	0.815	75.5	-68.05	273.15
275	0.00697	1.000	181.7	2497	4.211	1.855	1652	8.09	574	18.3	13.22	0.817	75.3	-32.74	275
280	0.00990	1.000	130.4	2485	4.198	1.858	1422	8.29	582	18.6	10.26	0.825	74.8	46.04	280
285	0.01387	1.000	99.4	2473	4.189	1.861	1225	8.49	590	18.9	8.81	0.833	74.3	114.1	285
290	0.01917	1.001	69.7	2461	4.184	1.864	1080	8.69	598	19.3	7.56	0.841	73.7	174.0	290
295	0.02617	1.002	51.94	2449	4.181	1.868	959	8.89	606	19.5	6.62	0.849	72.7	227.5	295
300	0.03531	1.003	39.13	2438	4.179	1.872	855	9.09	613	19.6	5.83	0.857	71.7	276.1	300
305	0.04712	1.005	29.71	2426	4.178	1.877	769	9.29	620	20.1	5.20	0.865	70.9	320.6	305
310	0.06221	1.007	22.93	2414	4.178	1.882	695	9.49	628	20.4	4.62	0.873	70.0	361.9	310
315	0.08132	1.009	17.82	2402	4.179	1.888	631	9.69	634	20.7	4.16	0.883	69.2	400.4	315
320	0.1053	1.011	13.98	2390	4.180	1.895	577	9.89	640	21.0	3.77	0.894	68.3	436.7	320
325	0.1351	1.013	11.06	2378	4.182	1.903	528	10.09	645	21.3	3.42	0.901	67.5	471.2	325
330	0.1719	1.016	8.82	2366	4.184	1.911	489	10.29	650	21.7	3.15	0.908	66.6	504.0	330
335	0.2167	1.018	7.09	2354	4.186	1.920	453	10.49	656	22.0	2.88	0.916	65.8	535.5	335
340	0.2713	1.021	5.74	2342	4.188	1.930	420	10.69	660	22.3	2.66	0.925	64.9	566.0	340
345	0.3372	1.024	4.683	2329	4.191	1.941	389	10.89	668	22.6	2.45	0.933	64.1	595.4	345
350	0.4163	1.027	3.846	2317	4.195	1.954	365	11.09	668	23.0	2.29	0.942	63.2	624.2	350
355	0.5100	1.030	3.180	2304	4.199	1.968	343	11.29	671	23.3	2.14	0.951	62.3	652.3	355
360	0.6209	1.034	2.645	2291	4.203	1.983	324	11.49	674	23.7	2.02	0.960	61.4	697.9	360
365	0.7514	1.038	2.212	2278	4.209	1.999	306	11.69	677	24.1	1.91	0.969	60.5	707.1	365
370	0.9040	1.041	1.861	2265	4.214	2.017	289	11.89	679	24.5	1.80	0.978	59.5	728.7	370
373.15	1.0133	1.044	1.679	2257	4.217	2.029	279	12.02	680	24.8	1.76	0.984	58.9	750.1	373.15
375	1.0815	1.045	1.574	2252	4.220	2.036	274	12.09	681	24.9	1.70	0.987	58.6	761	375
380	1.2469	1.049	1.37	2239	4.226	2.057	260	12.39	683	25.4	1.61	0.999	57.6	788	380
385	1.5113	1.053	1.102	2225	4.232	2.080	248	12.49	685	25.8	1.53	1.004	56.6	814	385

ANEXO B
PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL ACEITE
(INCROPERA)

TABLA A.5 Propiedades termofísicas de fluidos saturados*

Líquidos saturados

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^4$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	$\alpha \cdot 10^3$ (K ⁻¹)
Aceite de motor (sin usar)								
273	899.1	1.796	385	4.280	147	0.910	47,000	0.70
280	895.3	1.827	217	2.430	144	0.880	27,500	0.70
290	890.0	1.868	99.9	1.120	145	0.872	12,900	0.70
300	884.1	1.909	48.6	550	145	0.859	6,400	0.70
310	877.9	1.951	25.3	288	145	0.847	3,400	0.70
320	871.8	1.993	14.1	161	143	0.823	1,965	0.70
330	865.8	2.035	8.36	96.6	141	0.800	1,205	0.70
340	859.9	2.076	5.31	61.7	139	0.779	793	0.70
350	853.9	2.118	3.56	41.7	138	0.763	546	0.70
360	847.8	2.161	2.52	29.7	138	0.753	395	0.70
370	841.8	2.206	1.86	22.0	137	0.738	300	0.70
380	836.0	2.250	1.41	16.9	136	0.723	233	0.70
390	830.6	2.294	1.10	13.3	133	0.709	187	0.70
400	825.1	2.337	0.874	10.6	134	0.695	152	0.70
410	818.9	2.381	0.698	8.52	133	0.682	125	0.70
420	812.1	2.427	0.564	6.94	133	0.675	103	0.70
430	806.5	2.471	0.470	5.83	132	0.662	88	0.70
Etilenglicol [C₂H₄(OH)₂]								
273	1,130.8	2.294	6.51	57.6	242	0.933	617	0.65
280	1,125.8	2.323	4.20	37.3	244	0.933	400	0.65
290	1,118.8	2.368	2.47	22.1	248	0.936	236	0.65
300	1,114.4	2.415	1.57	14.1	252	0.939	151	0.65
310	1,103.7	2.460	1.07	9.65	255	0.939	103	0.65
320	1,096.2	2.505	0.757	6.91	258	0.940	73.5	0.65
330	1,089.5	2.549	0.561	5.15	260	0.936	55.0	0.65
340	1,083.8	2.592	0.431	3.98	261	0.929	42.8	0.65
350	1,079.0	2.637	0.342	3.17	261	0.917	34.6	0.65
360	1,074.0	2.682	0.278	2.59	261	0.906	28.6	0.65
370	1,066.7	2.728	0.228	2.14	262	0.900	23.7	0.65
373	1,058.5	2.742	0.215	2.03	263	0.906	22.4	0.65
Glicerina [C₃H₈(OH)₃]								
273	1,276.0	2.261	1,060	8,310	282	0.977	85,000	0.47
280	1,271.9	2.298	534	4,200	284	0.972	43,200	0.47
290	1,265.8	2.367	185	1,460	286	0.955	15,300	0.48
300	1,259.9	2.427	79.9	634	286	0.935	6,780	0.48
310	1,253.9	2.490	35.2	281	286	0.916	3,060	0.48
320	1,247.2	2.564	21.0	168	287	0.897	1,870	0.50

ANEXO C
PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS HIDROCARBUROS
(DONALD KERN)

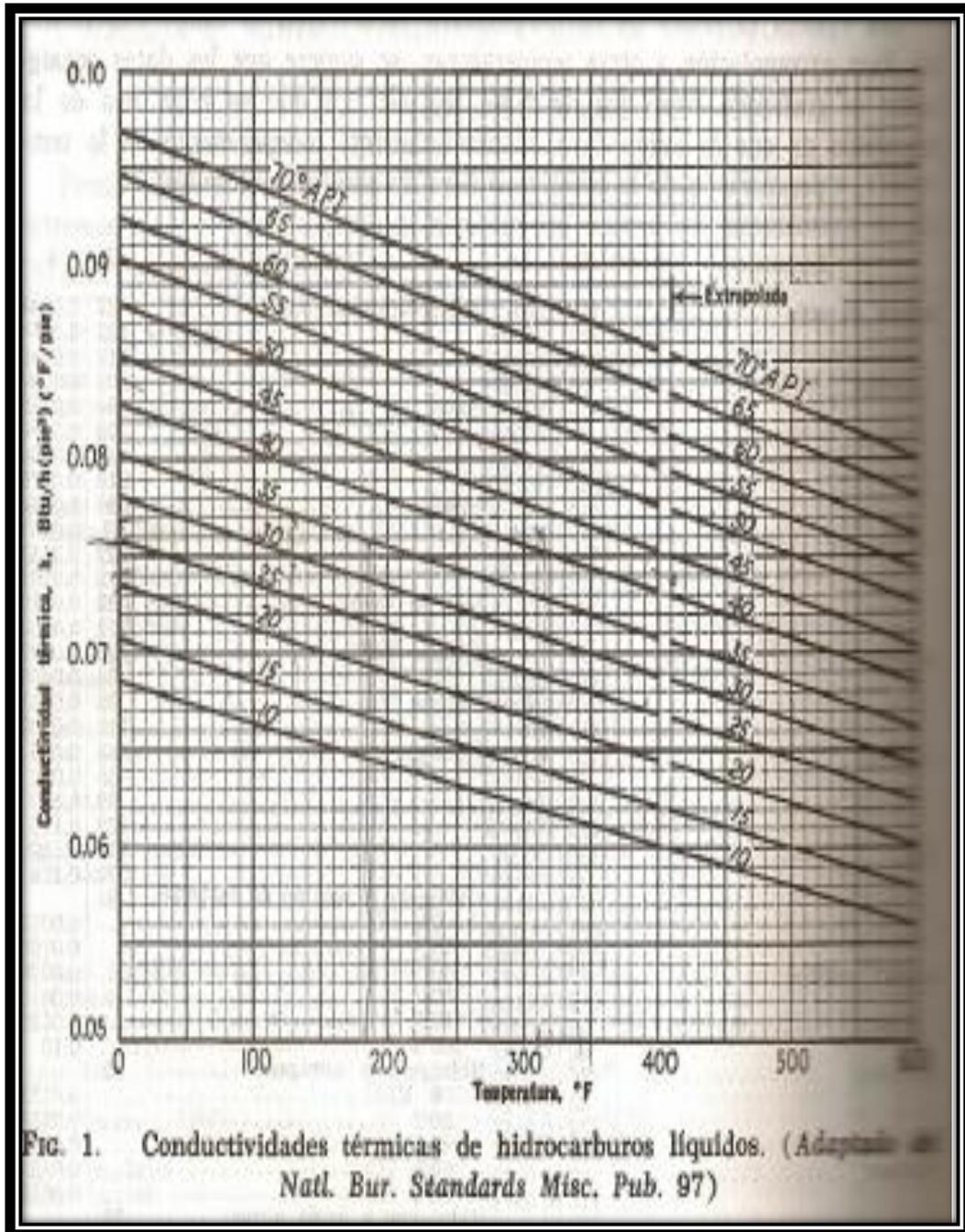
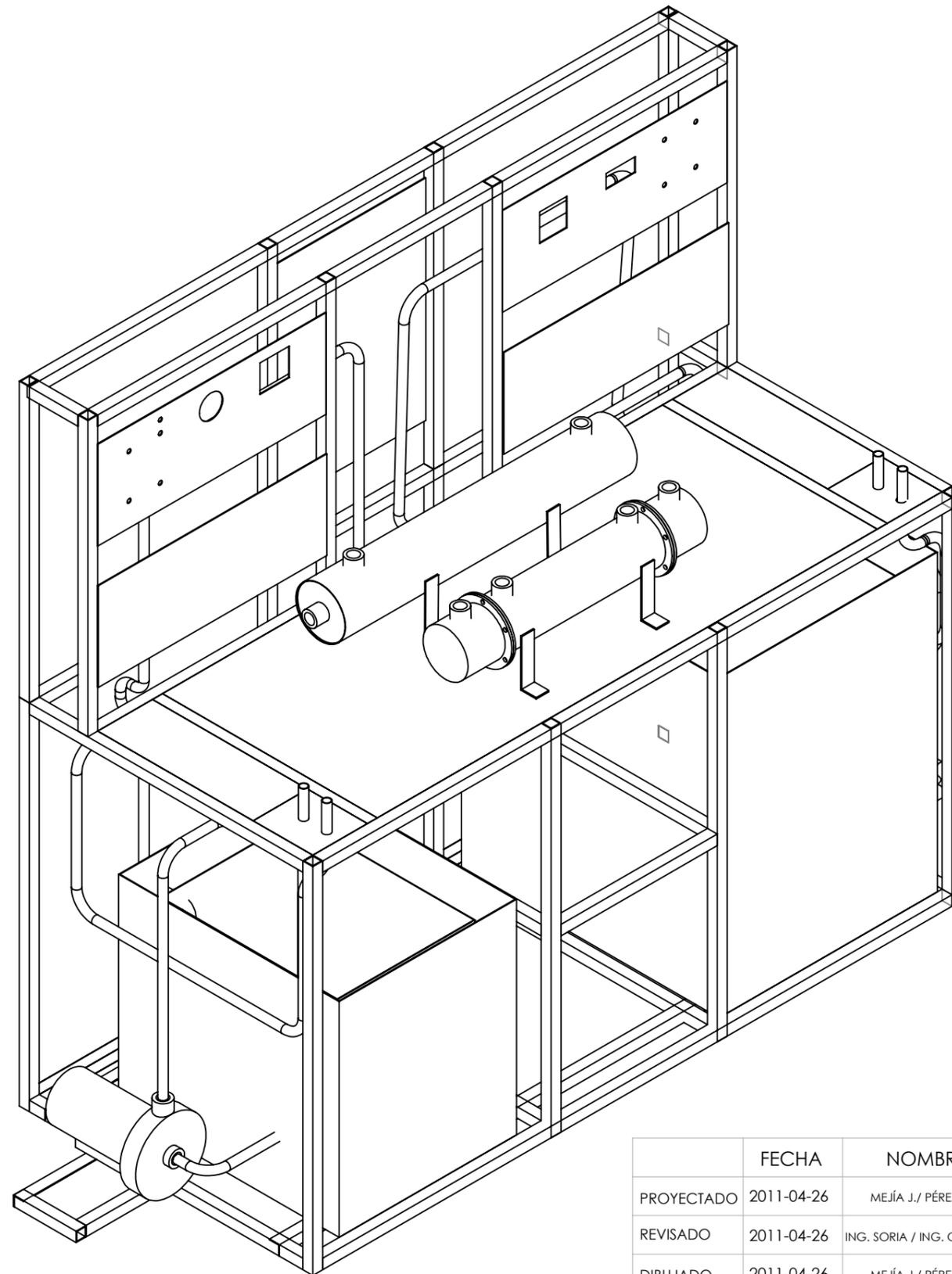


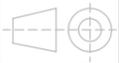
FIG. 1. Conductividades térmicas de hidrocarburos líquidos. (Adaptado de Natl. Bur. Standards Misc. Pub. 97)

ANEXO D

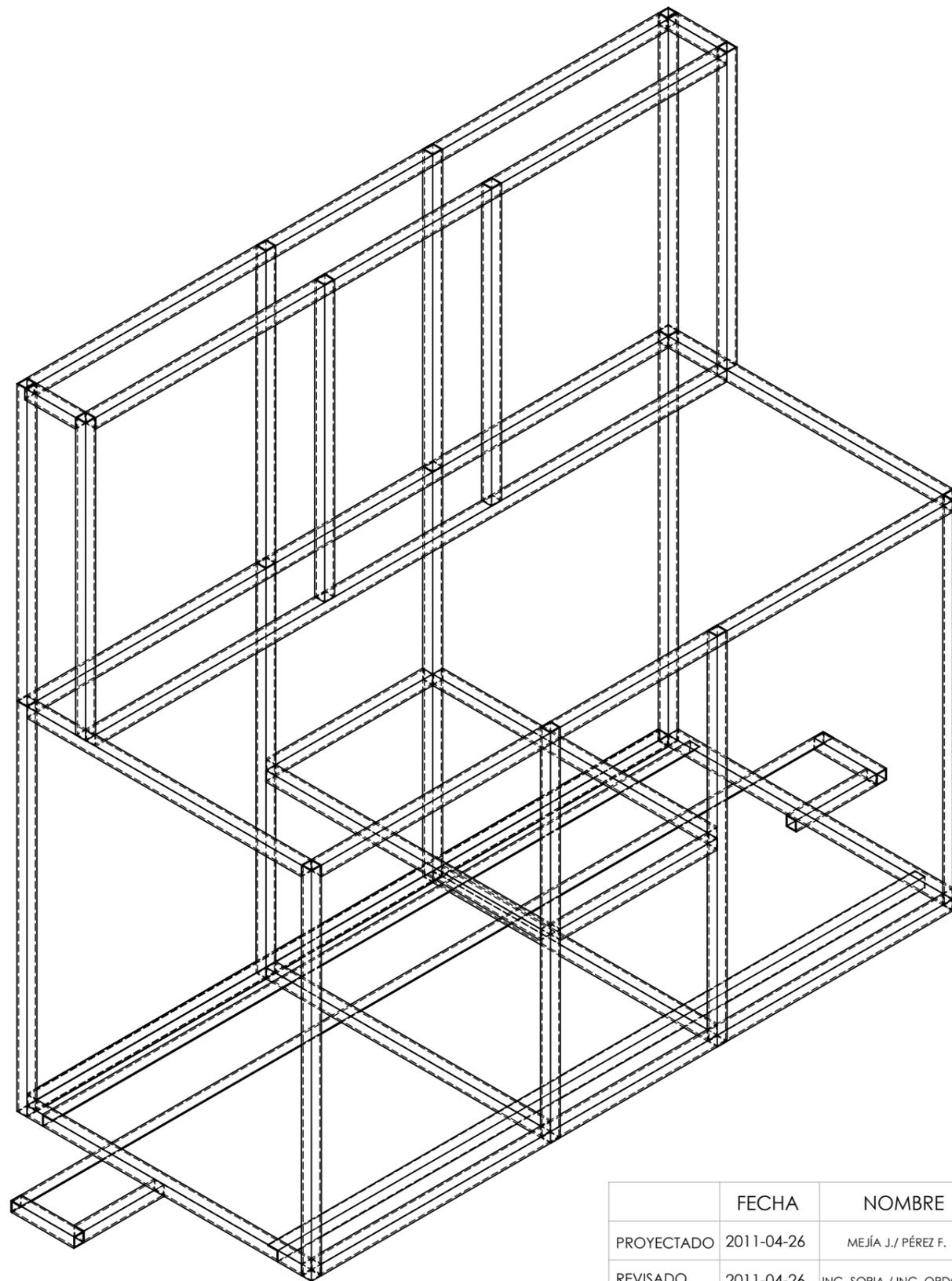
PLANOS

ISOMETRIA BANCO DE PRUEBAS

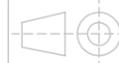


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: INDICADO	ESCALA: 1:10
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: 001	 HOJA: 1/1
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				SUSTITUYE A:	

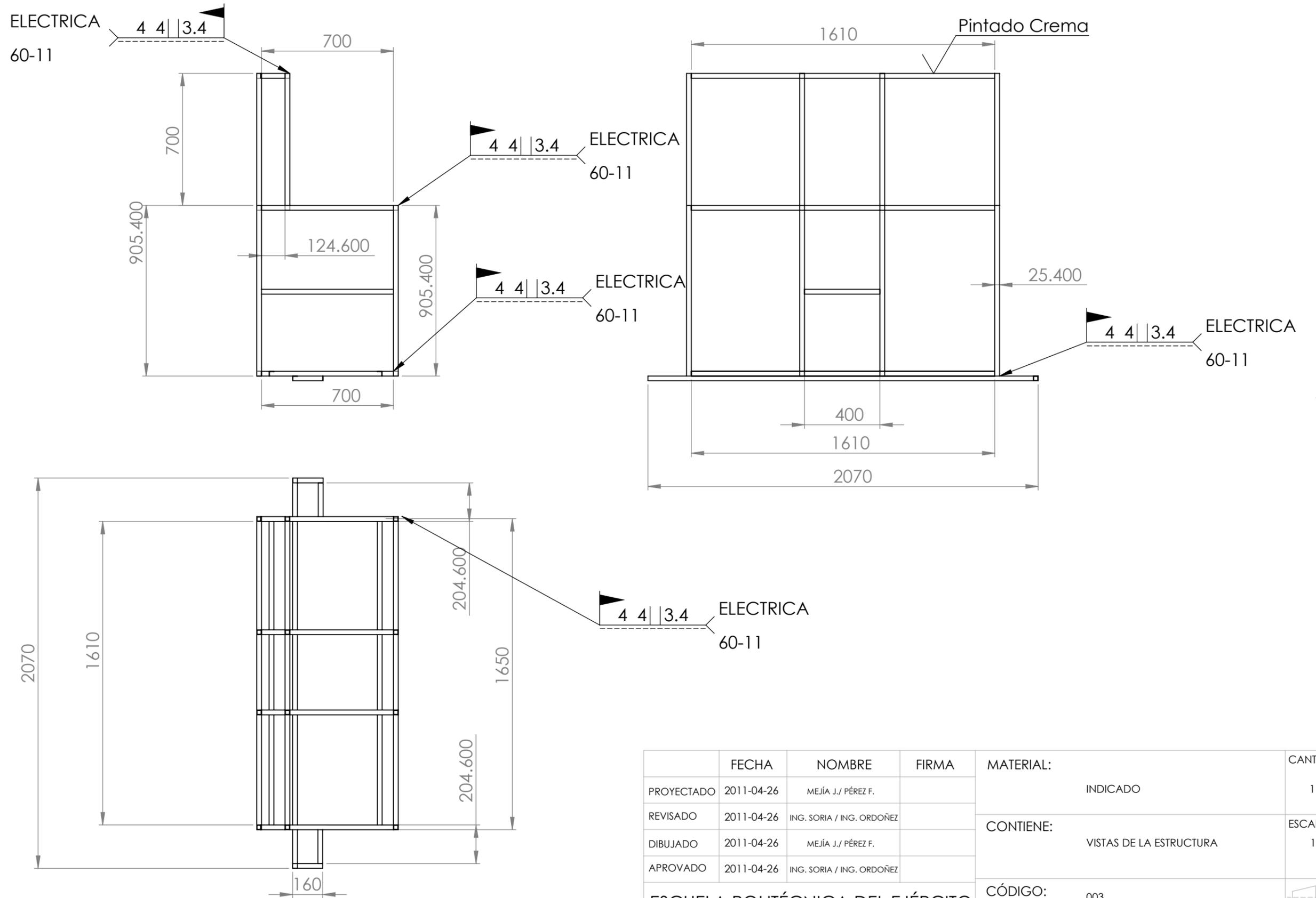
ISOMETRIA DE LA ESTRUCTURA



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE:	ESCALA:
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO:	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				003	
				SUSTITUYE A:	

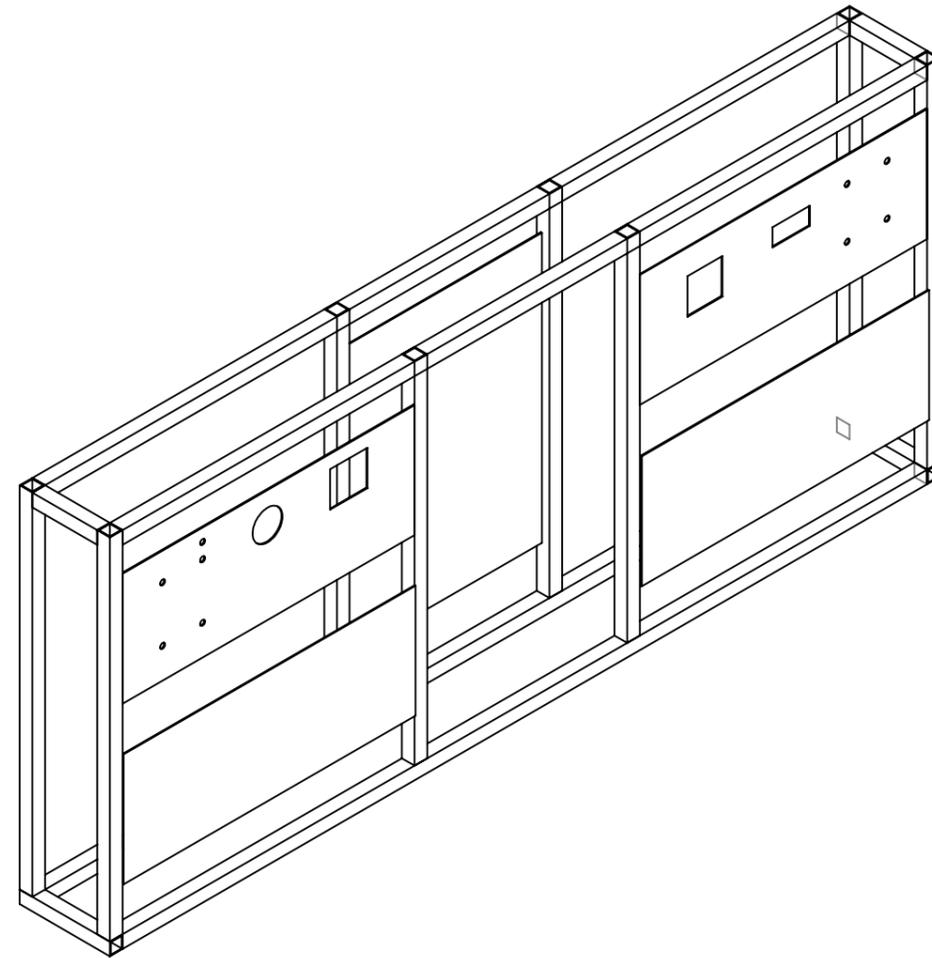


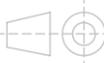
ESTRUCTURA



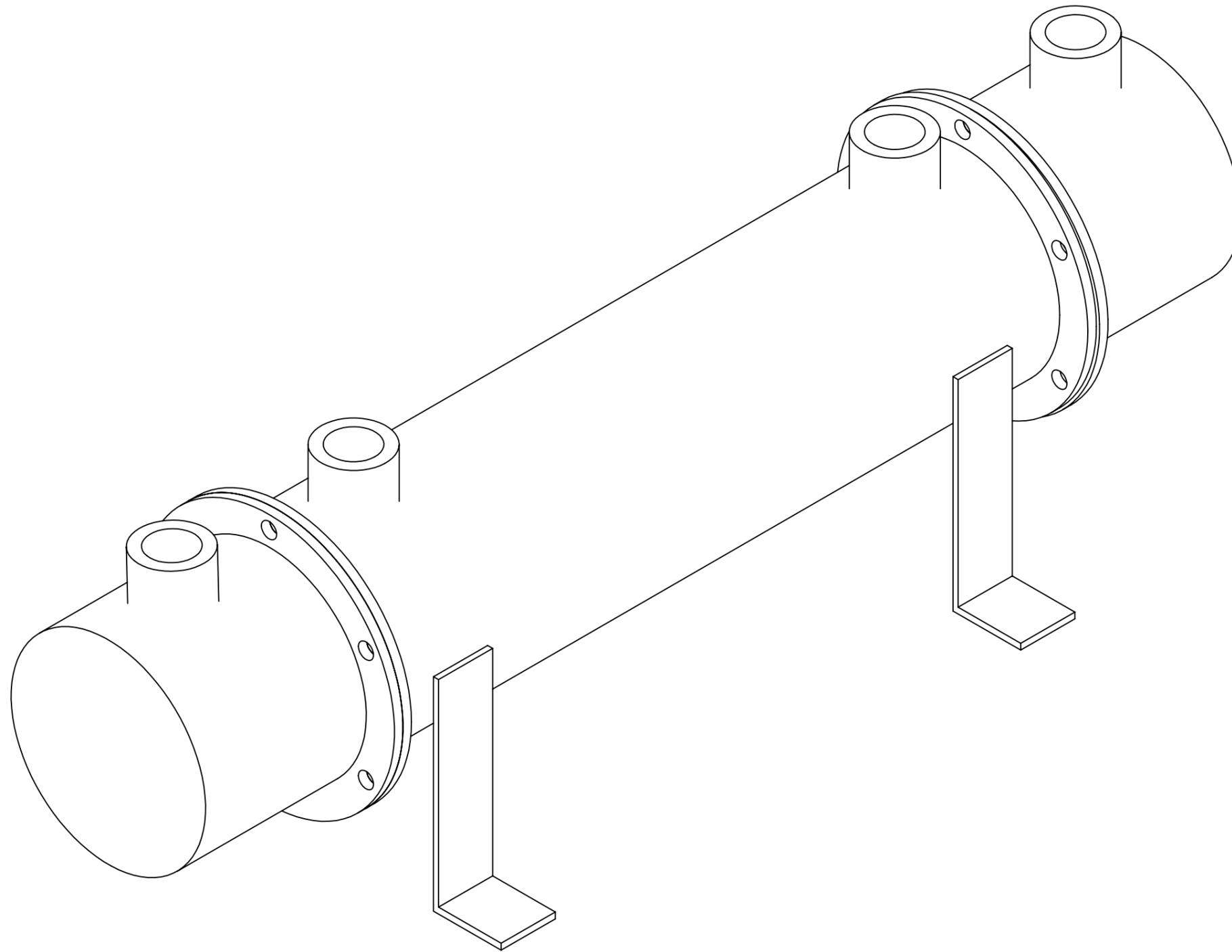
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: VISTAS DE LA ESTRUCTURA	ESCALA: 1:20
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				CÓDIGO: 003	HOJA: 2/2
				SUSTITUYE A:	

ISOMETRIA DEL PANEL



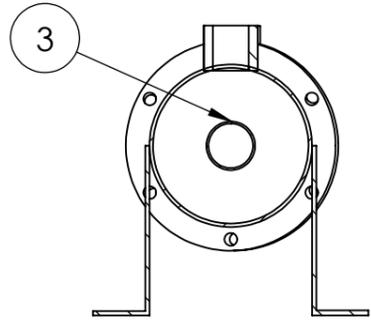
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: INDICADO	ESCALA: 1:10
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: 004	 HOJA: 1/2
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				SUSTITUYE A:	

ISOMETRIA I.C. TUBO CONCENTRICO

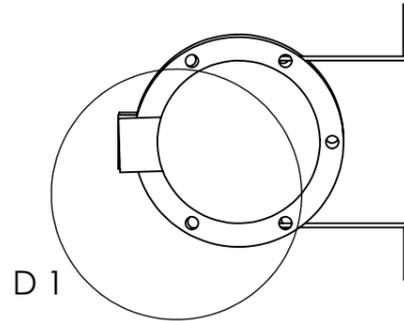


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: INDICADO	ESCALA: 1:2
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				CÓDIGO: 002	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/3

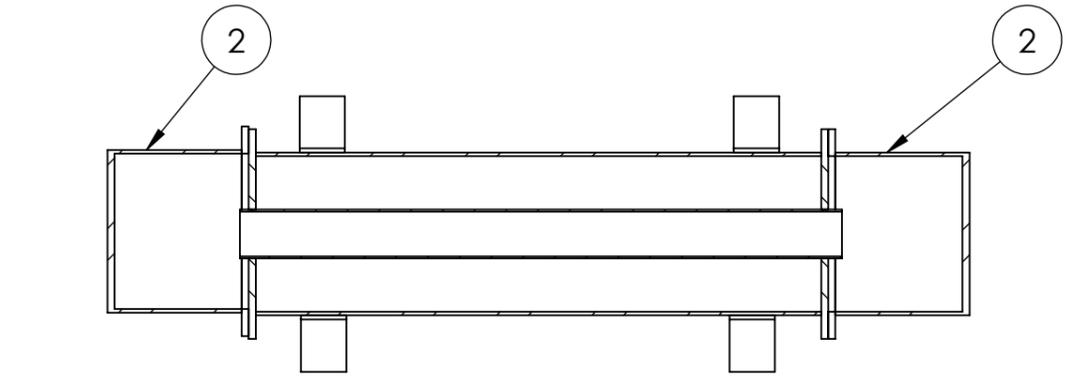
I.C. TUBO CONCENTRICO



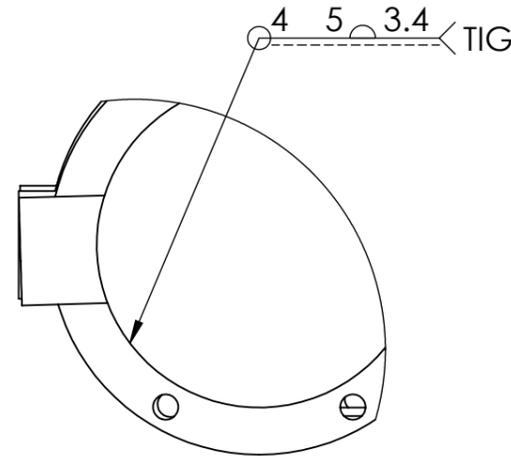
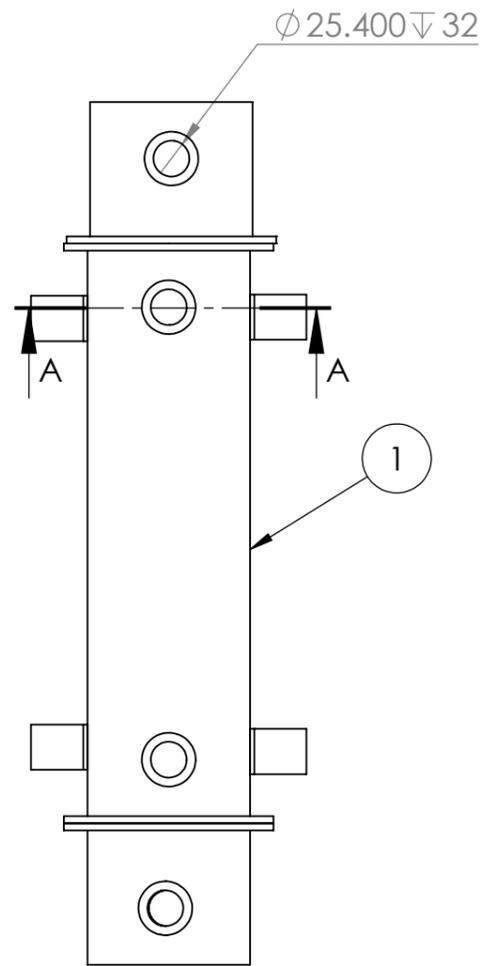
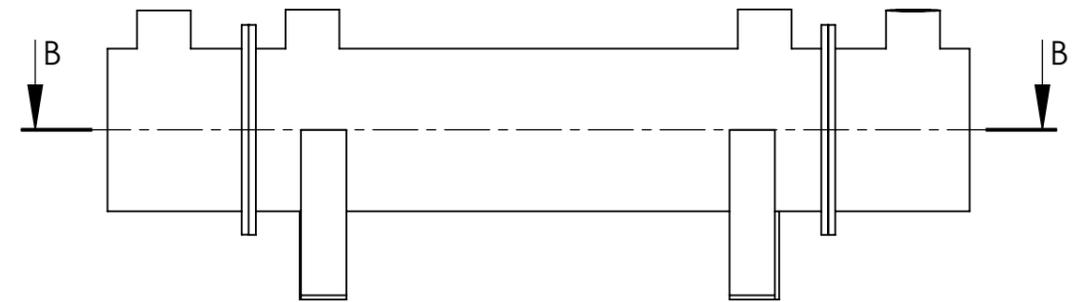
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 5



D 1



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 5



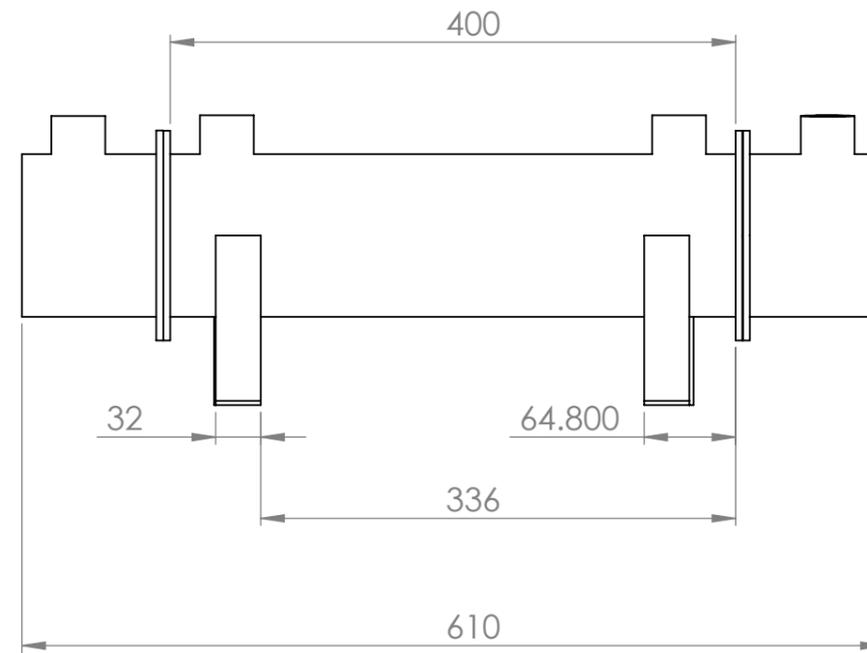
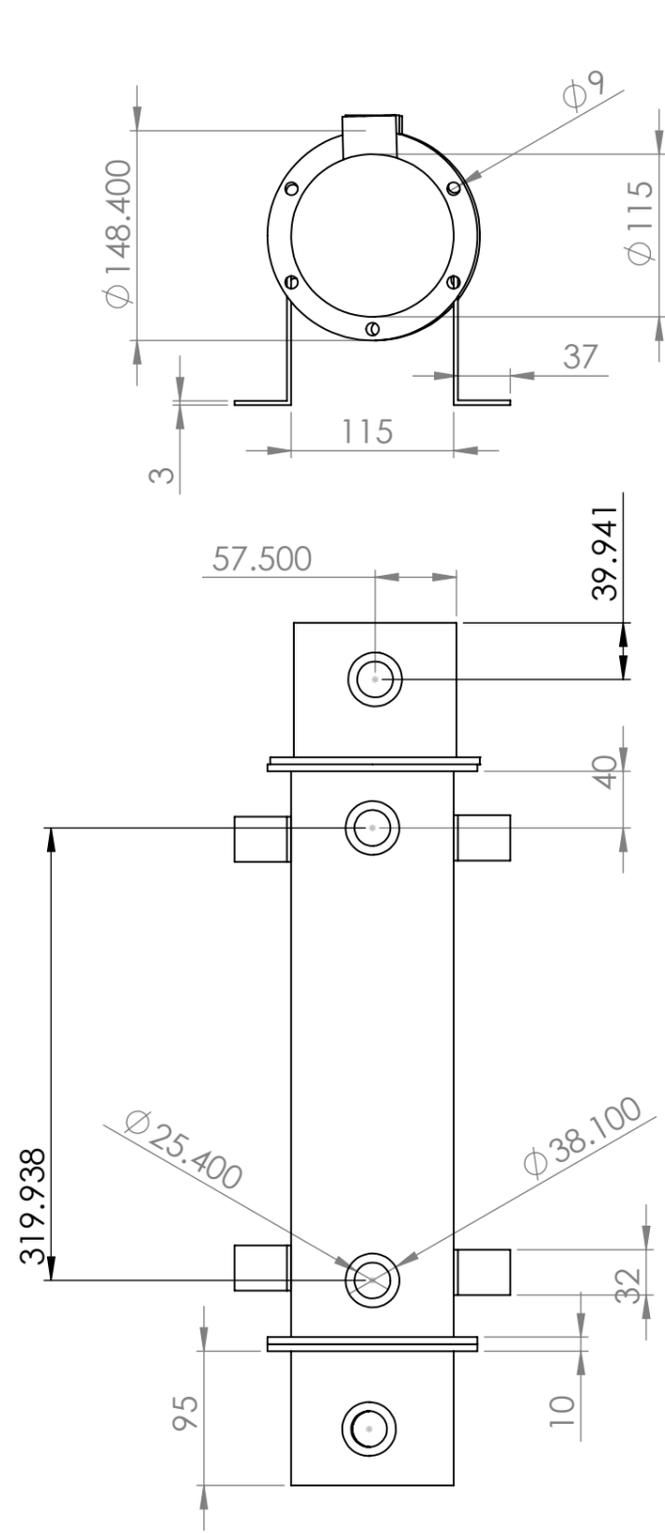
DETAIL D 1
SCALE 2 : 5

TABLA DE MATERIALES

NO.	DESCRIPCION	MATERIAL	CANT.
1	CORAZA	ACERO A - 36	1
2	CABEZALES	ACERO A - 36	2
3	TUBO INTERNO	COBRE	1

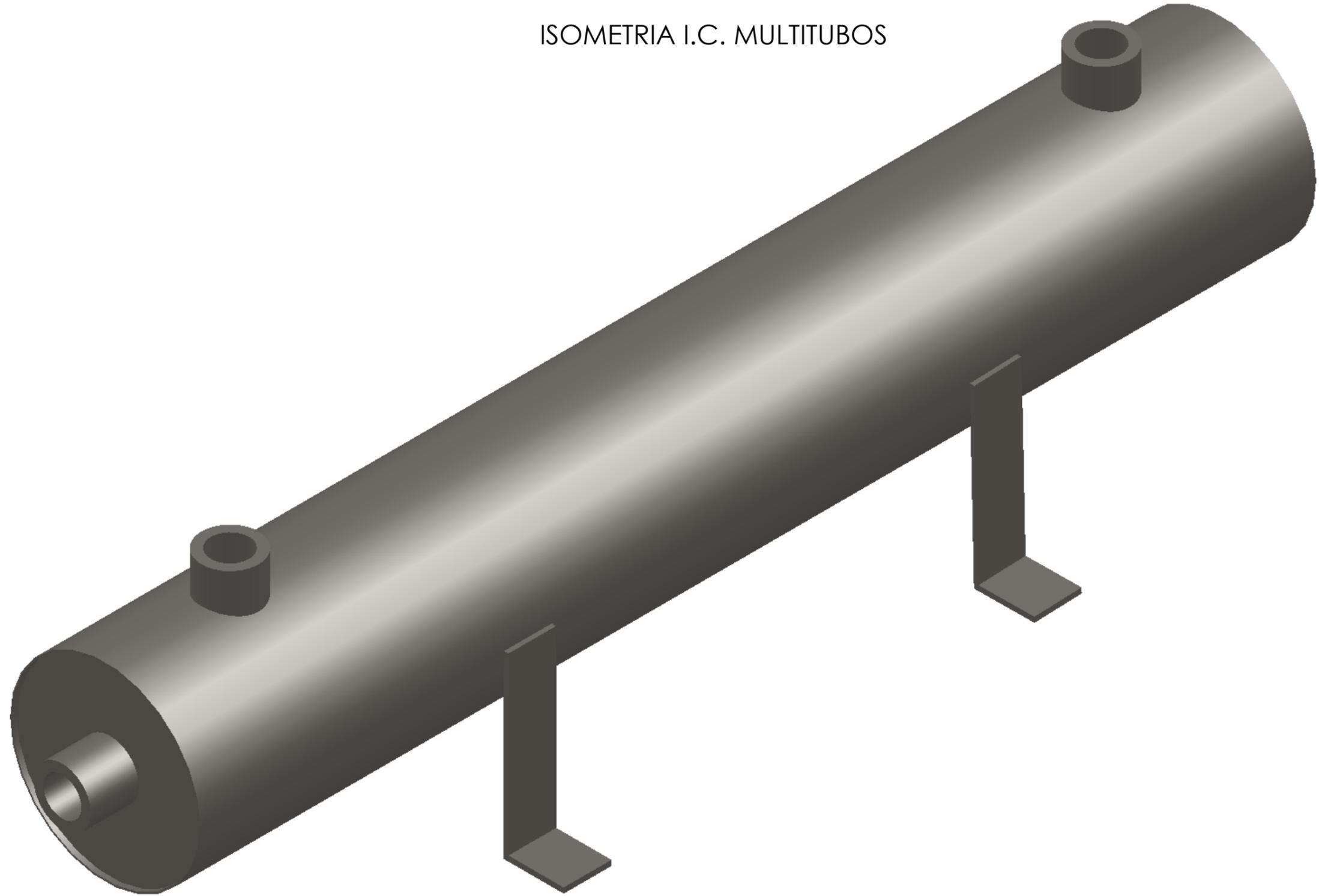
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J. / PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: DETALLES I.C. TUBO CONCENTRICO	ESCALA: 1: 5
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J. / PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				CÓDIGO: 002	HOJA: 2/3
				SUSTITUYE A:	

I.C. TUBO CONCENTRICO



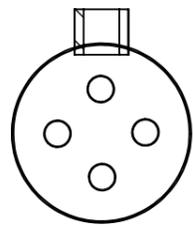
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: VISTAS I.C. TUBO CONCENTRICO	ESCALA: 1:5
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: 002	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				SUSTITUYE A:	HOJA: 3/3

ISOMETRIA I.C. MULTITUBOS

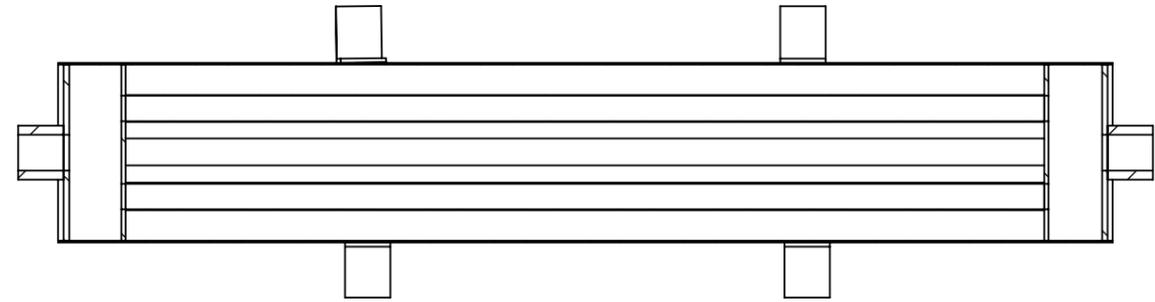
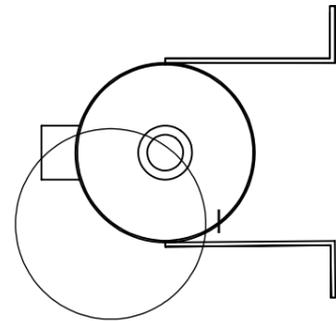


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: INDICADO	ESCALA: 1:2
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/3

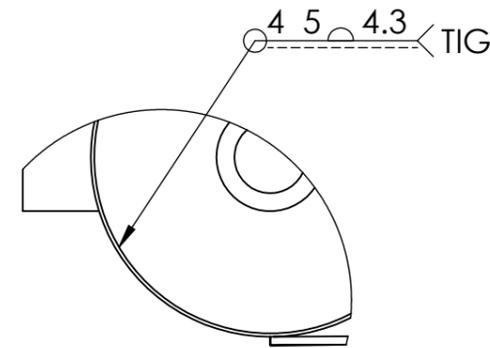
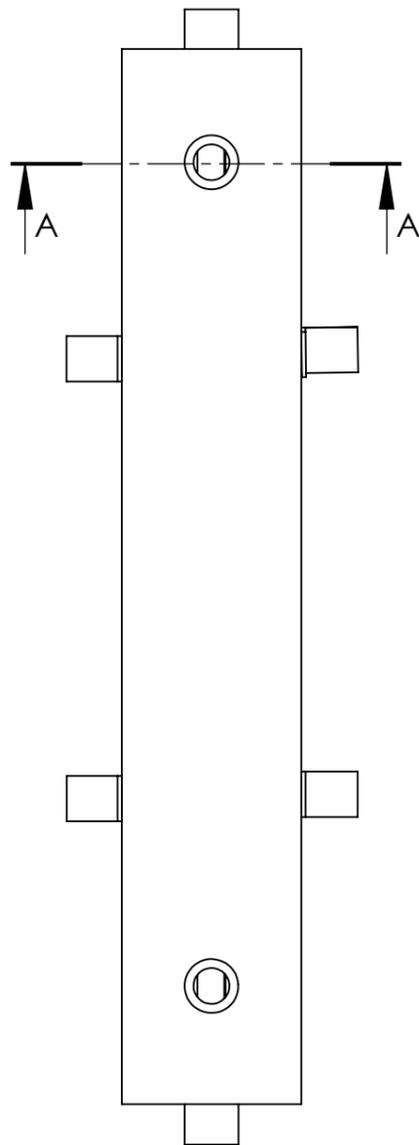
I.C. TUBO MULTITUBOS



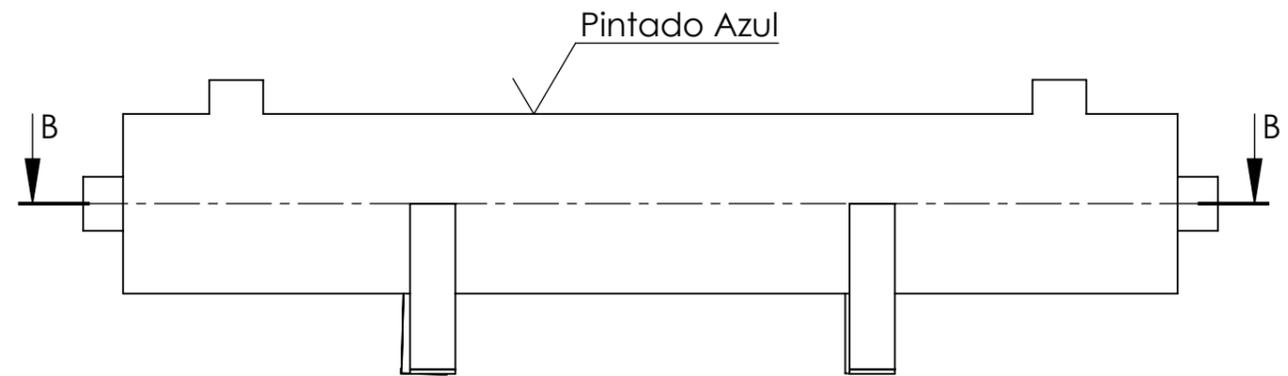
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 5



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 5

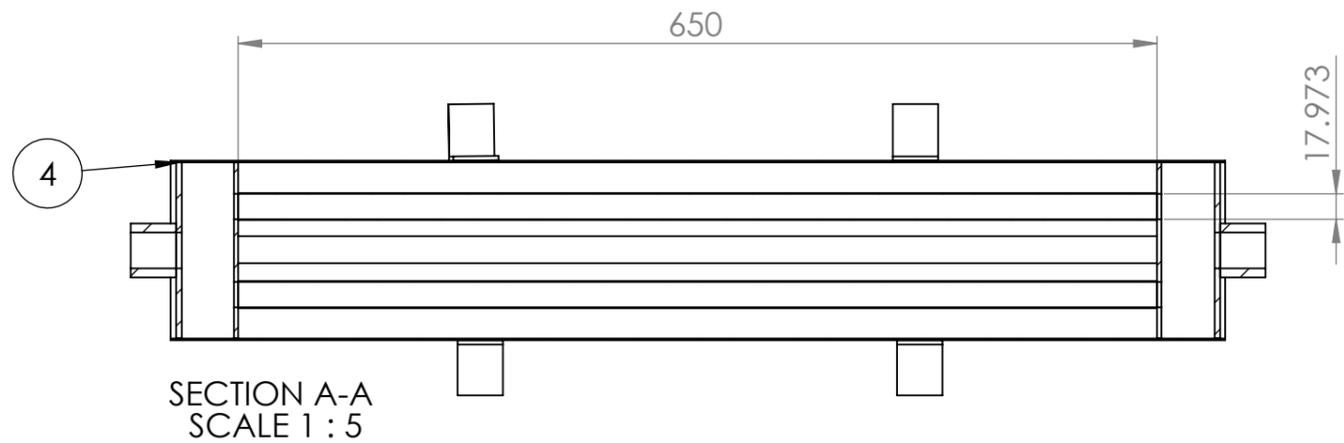
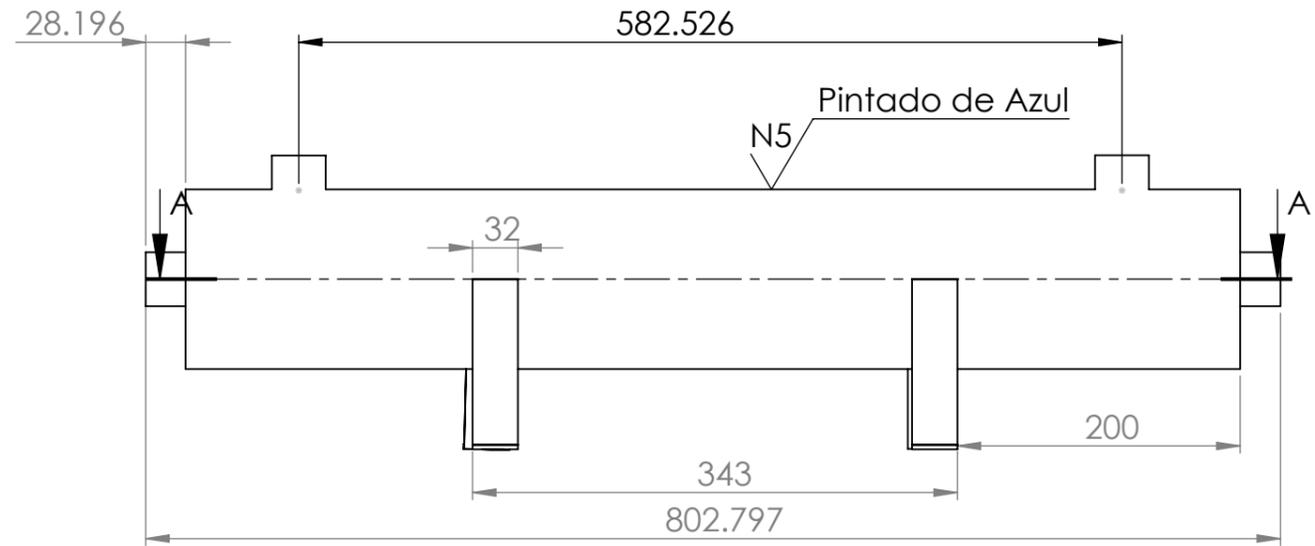
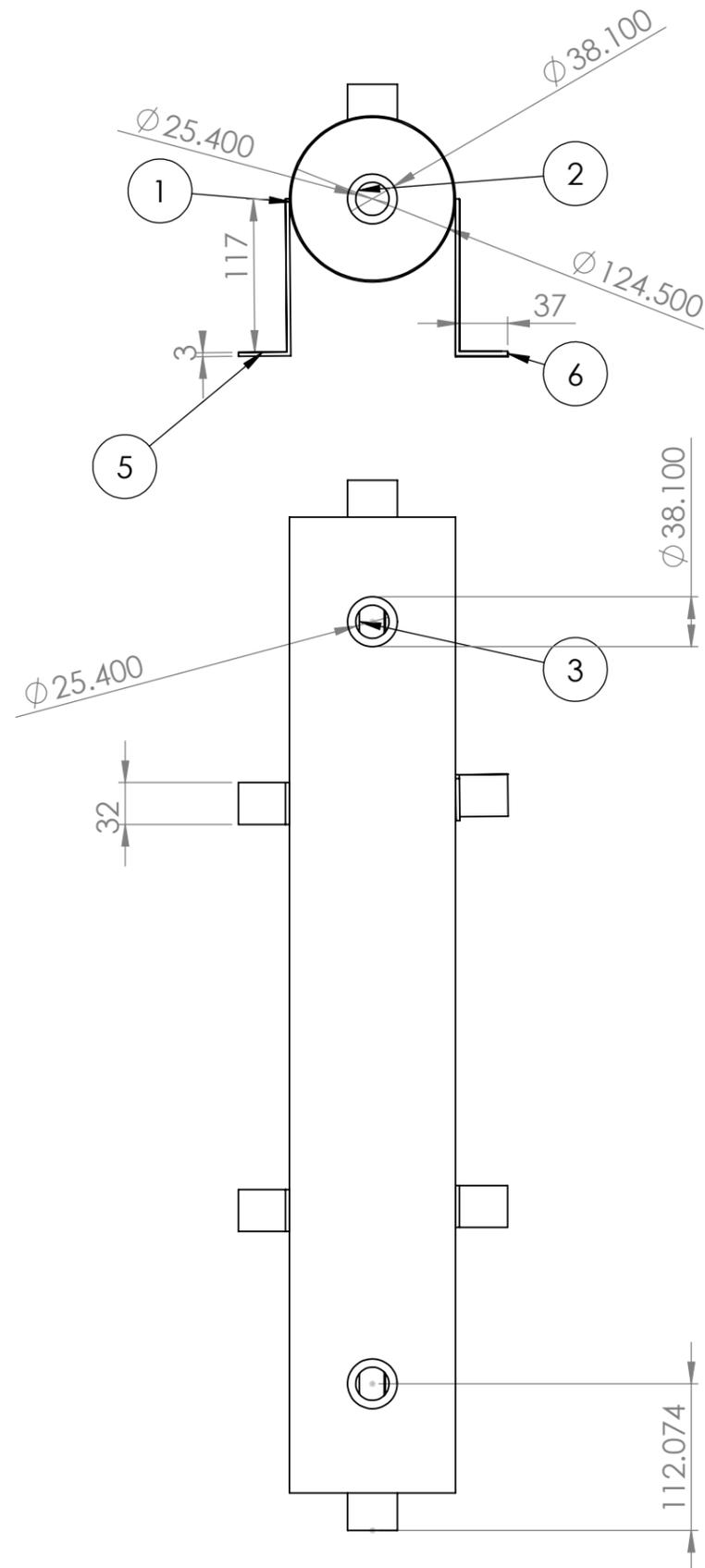


DETAIL I
SCALE 2 : 5



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J. / PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: DETALLE I.C. MULTITUBOS	ESCALA: 1:5
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J. / PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: 002	 HOJA: 2/3
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				SUSTITUYE A:	

I.C. TUBO MULTITUBOS



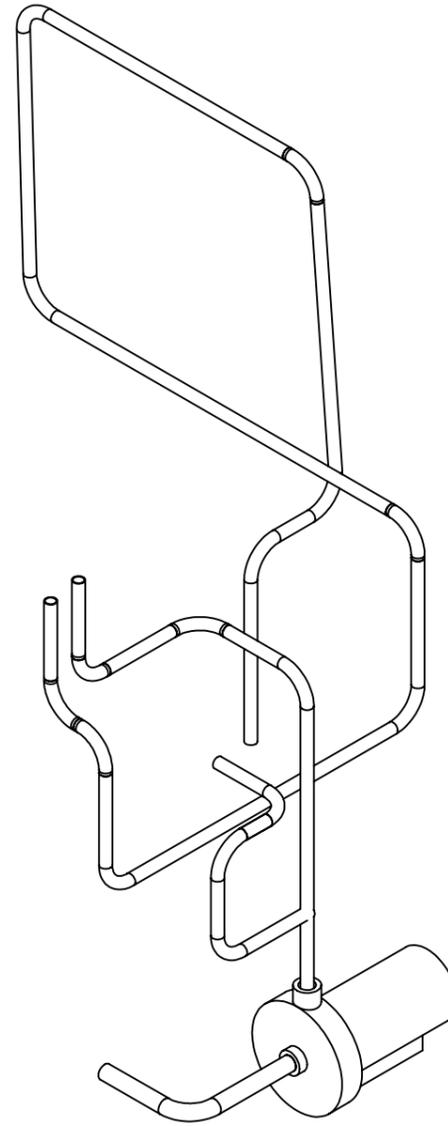
SECTION A-A
SCALE 1 : 5

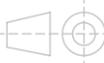
TABLA DE MATERIALES

NO.	DESCRIPCION	MATERIAL	CANT.
1	CORAZA	ACERO A - 36	1
2	Entradas	ACERO SAE 5.2	4
3	TUBOS INTERNOS	ACERO GALVANIZADO	4
4	TAPA EXTERIOR	ACERO A - 36	2
5	SOPORTES	ACERO A - 36	2
6	SOPORTES	ACERO A - 36	2

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: VISTAS I.C. MULTITUBOS	ESCALA: 1:5
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: INDICADO	HOJA: 3/3
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				SUSTITUYE A:	

ISOMETRIA TUBERIA DE AGUA



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: INDICADO	ESCALA: 1:10
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ			
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				CÓDIGO: 007	 HOJA: 1/2
				SUSTITUYE A:	

TUBERIA DE AGUA

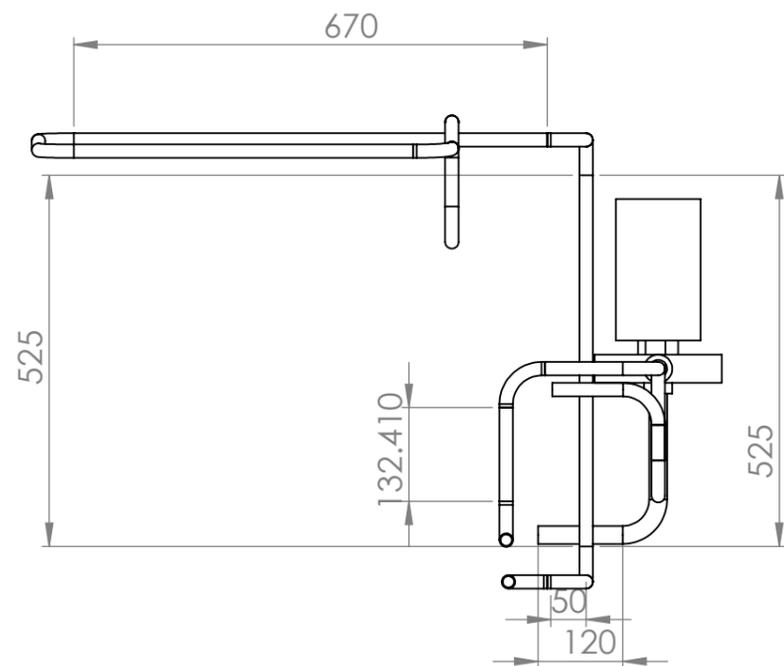
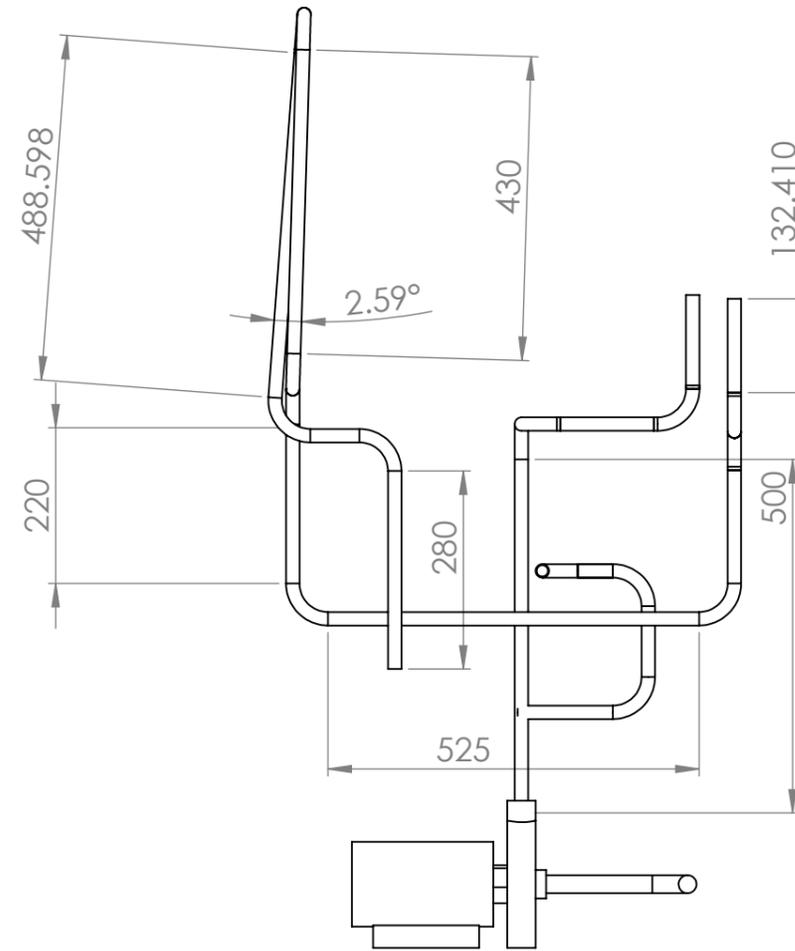
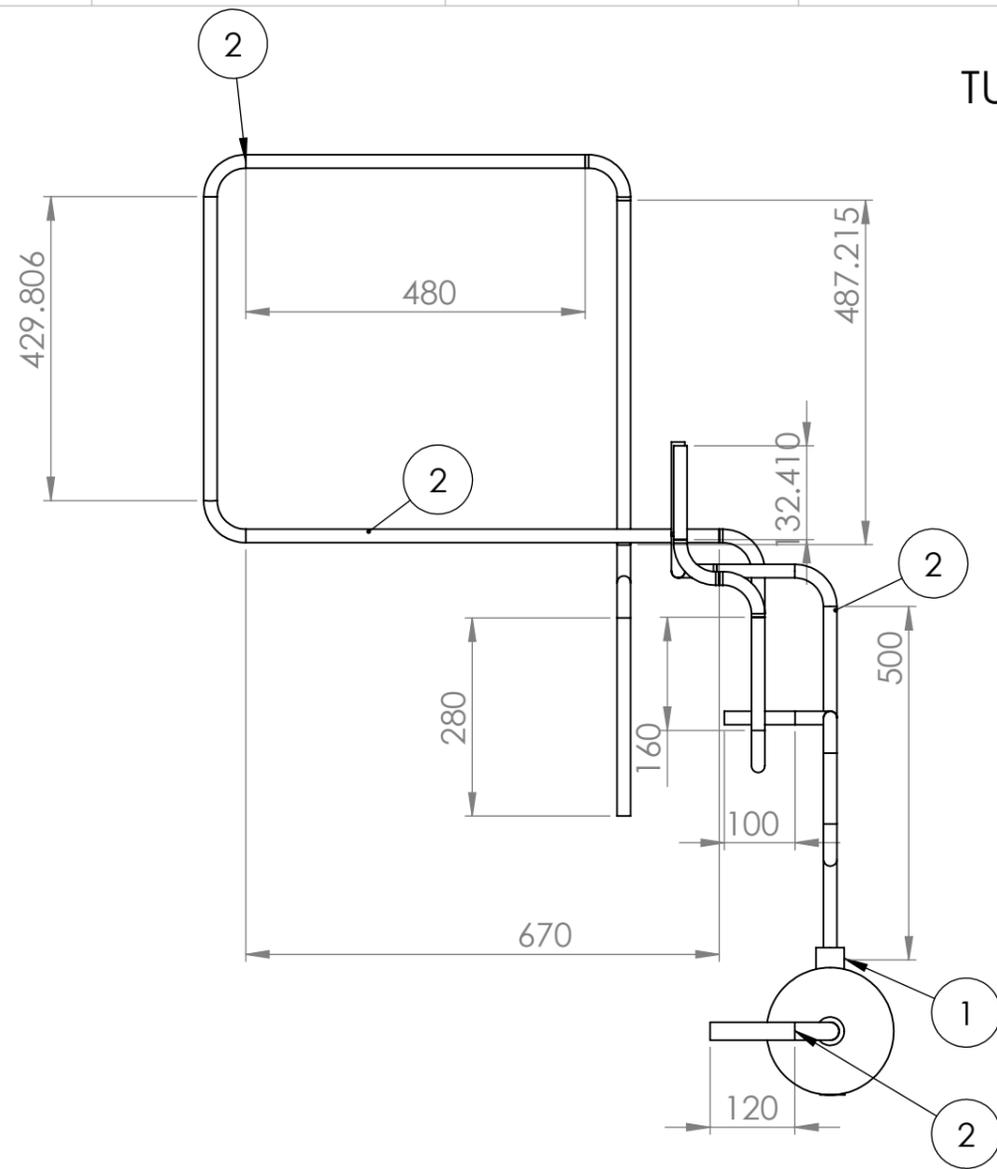
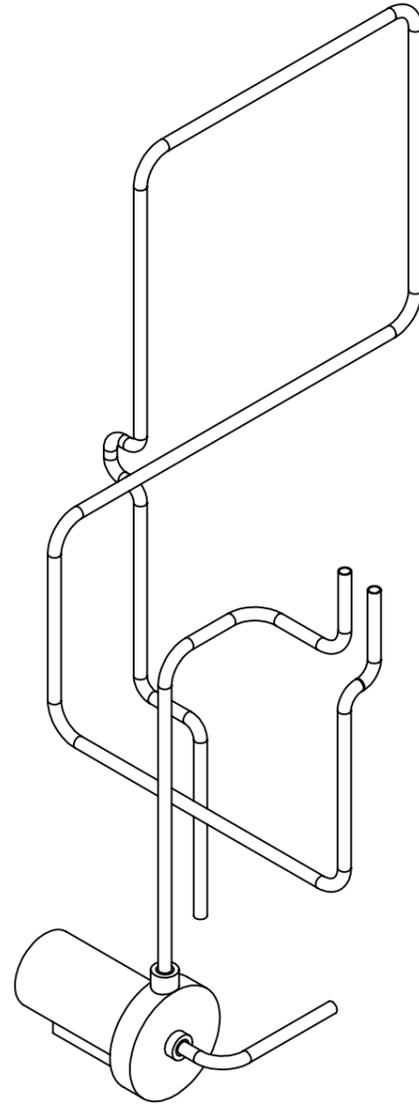
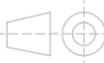


TABLA DE MATERIALES

NO.	DESCRIPCION			MATERIAL	QTY.
1	BOMBA			INDICADA	1
2	TUBERIA			PLASTICO PVC	16
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE:	ESCALA:
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		VISTAS TUBERIA DE AGUA	1:10
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO:	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				007	
				SUSTITUYE A:	HOJA: 2/2

ISOMETRIA TUBERIA DE ACEITE



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: INDICADO	ESCALA: 1:10
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: 006	 HOJA: 1/2
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				SUSTITUYE A:	

TUBERIA DE ACEITE

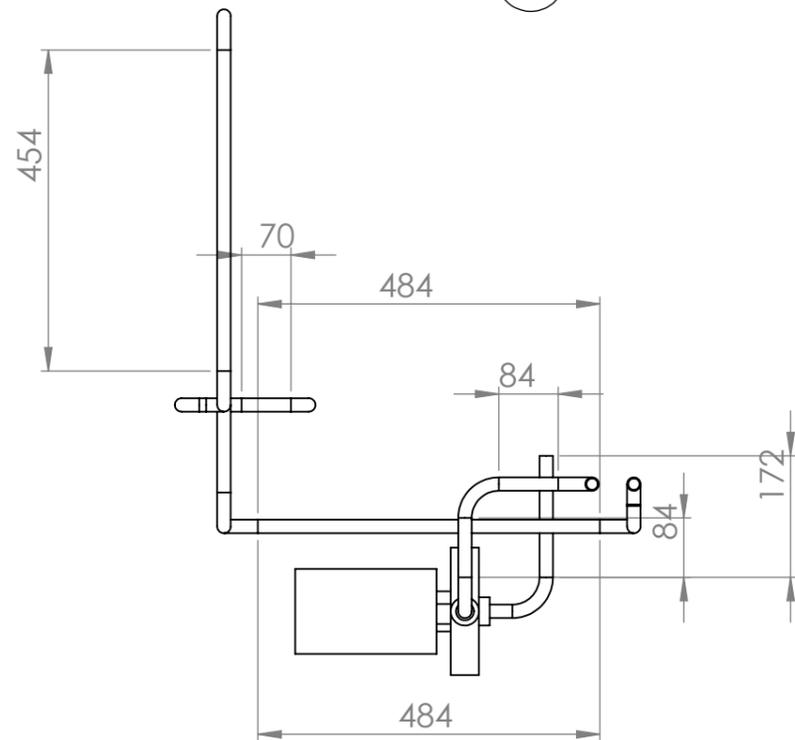
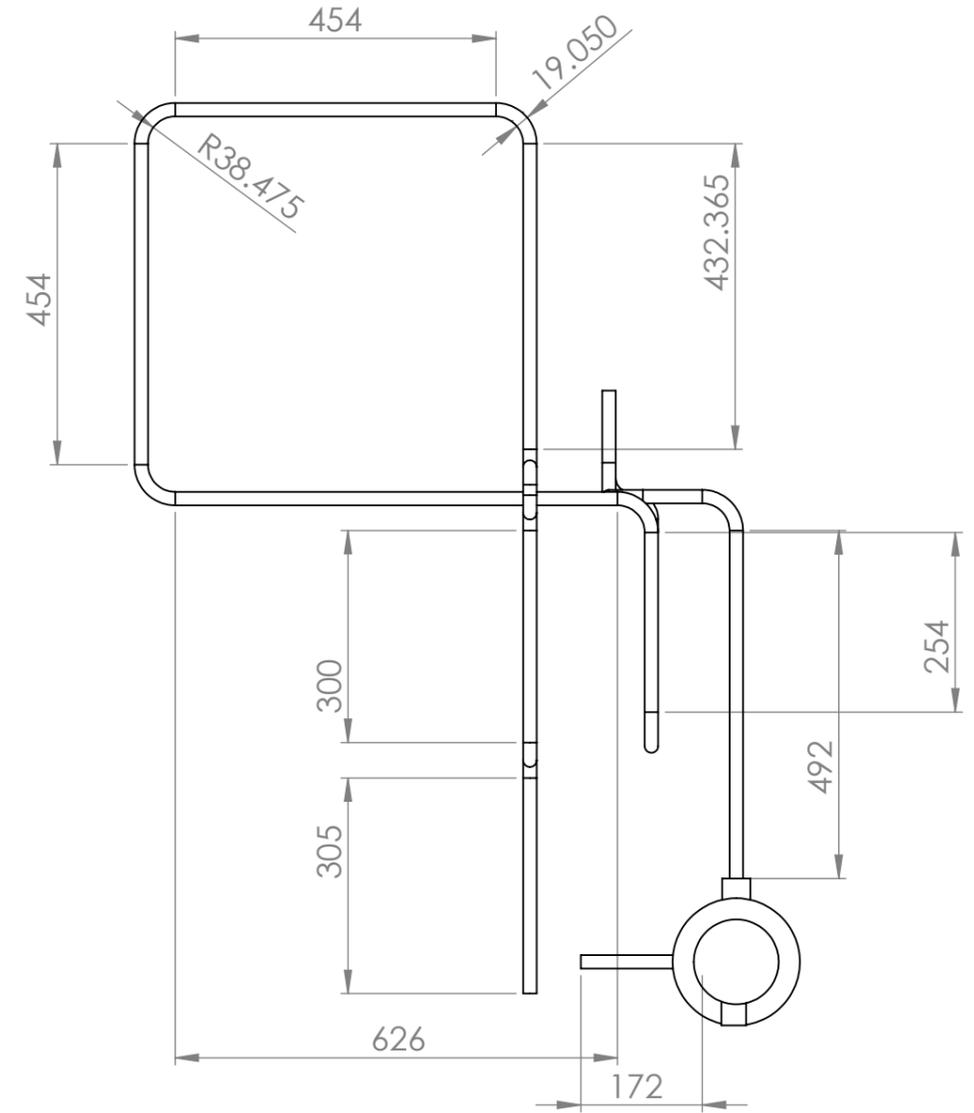
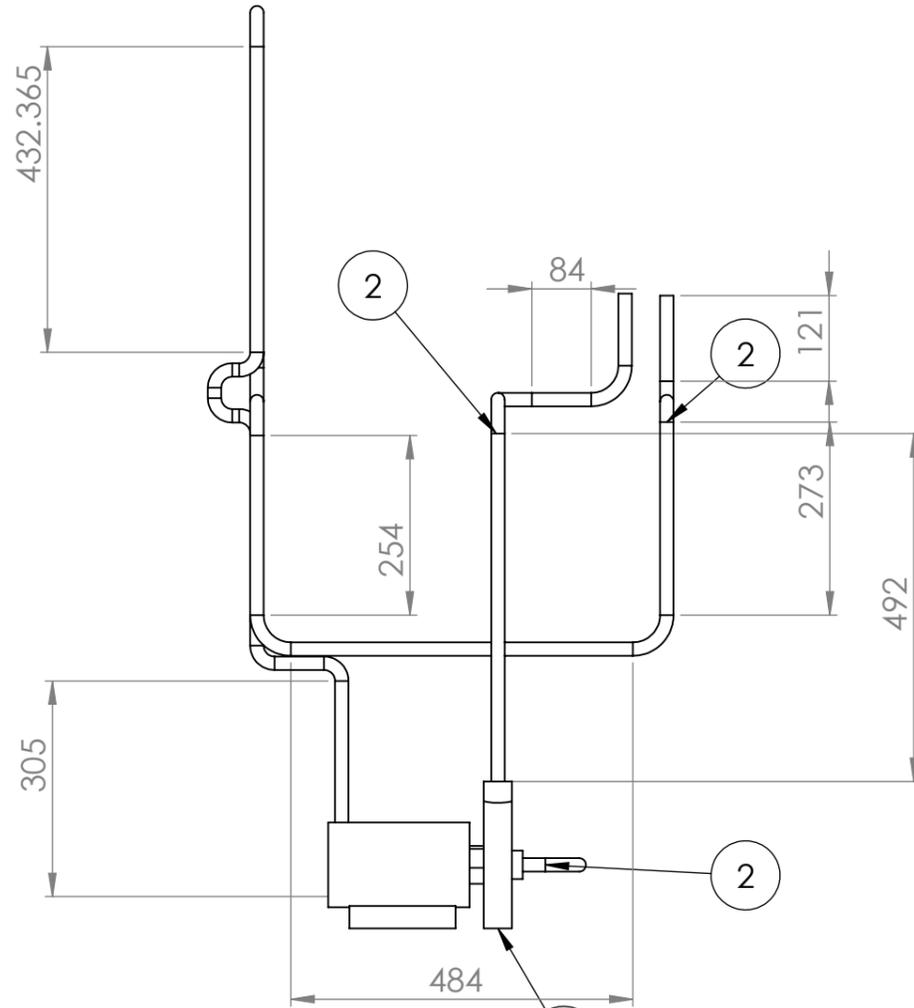
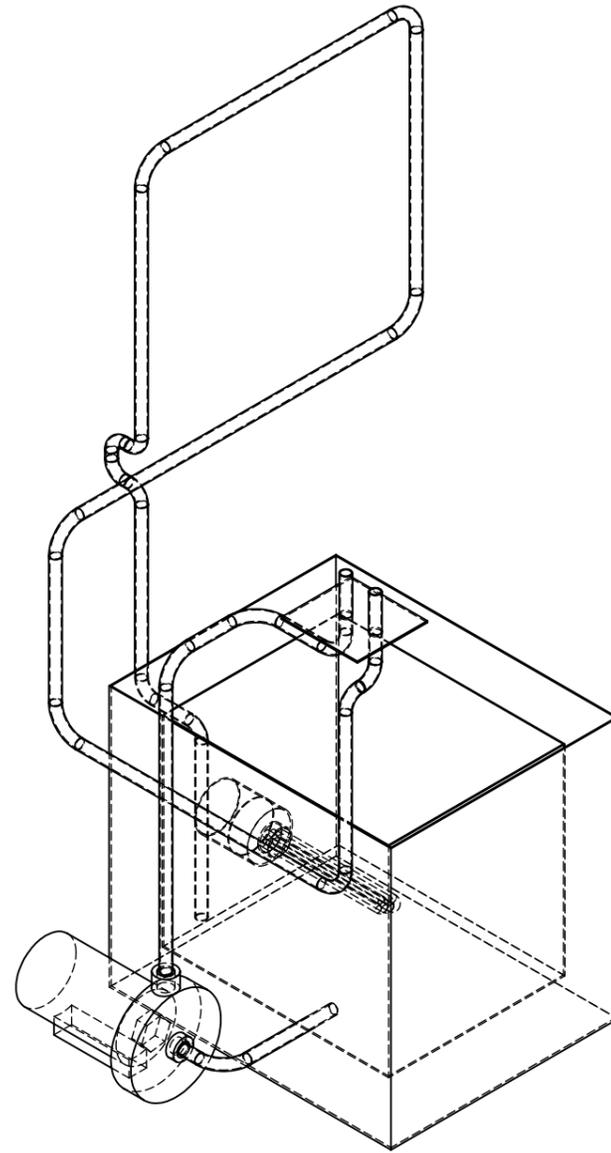
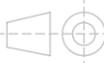


TABLA DE MATERIALES

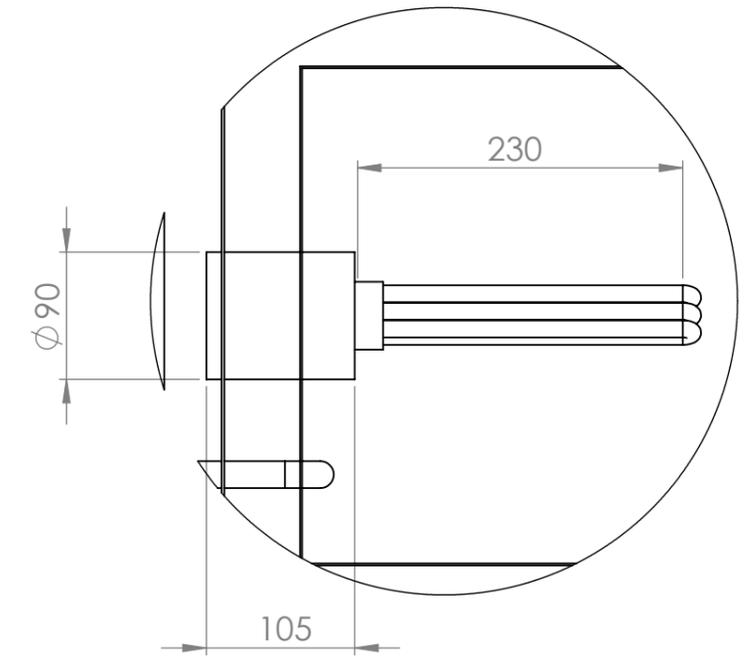
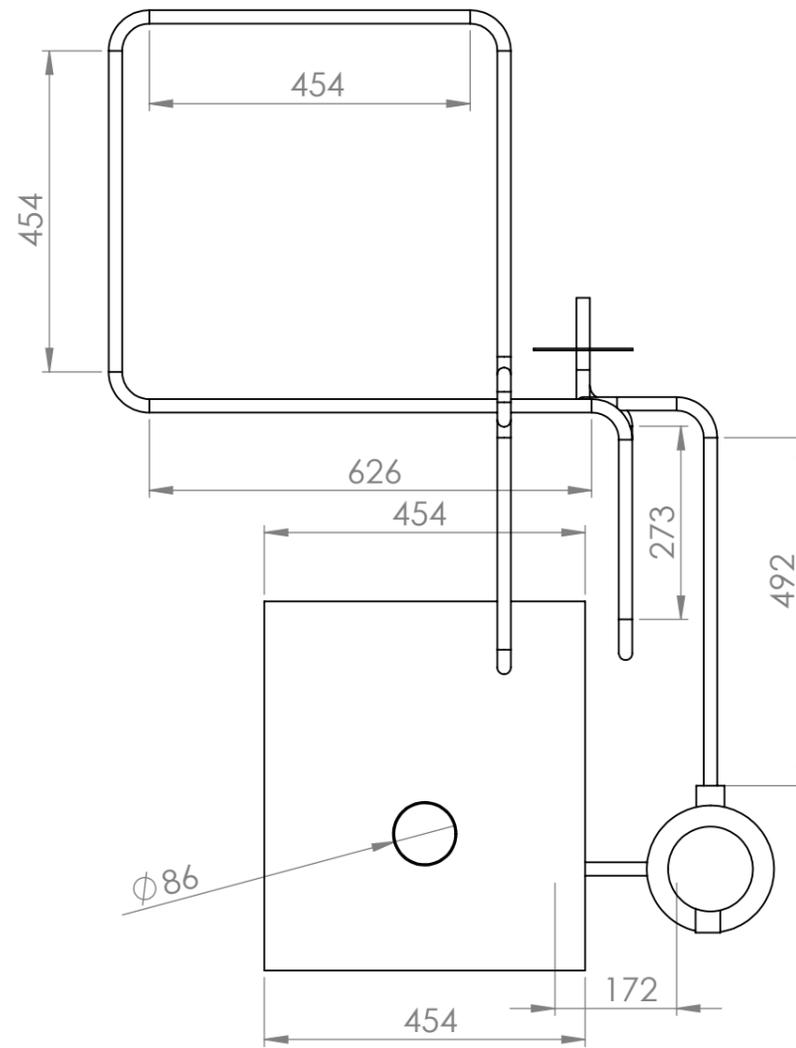
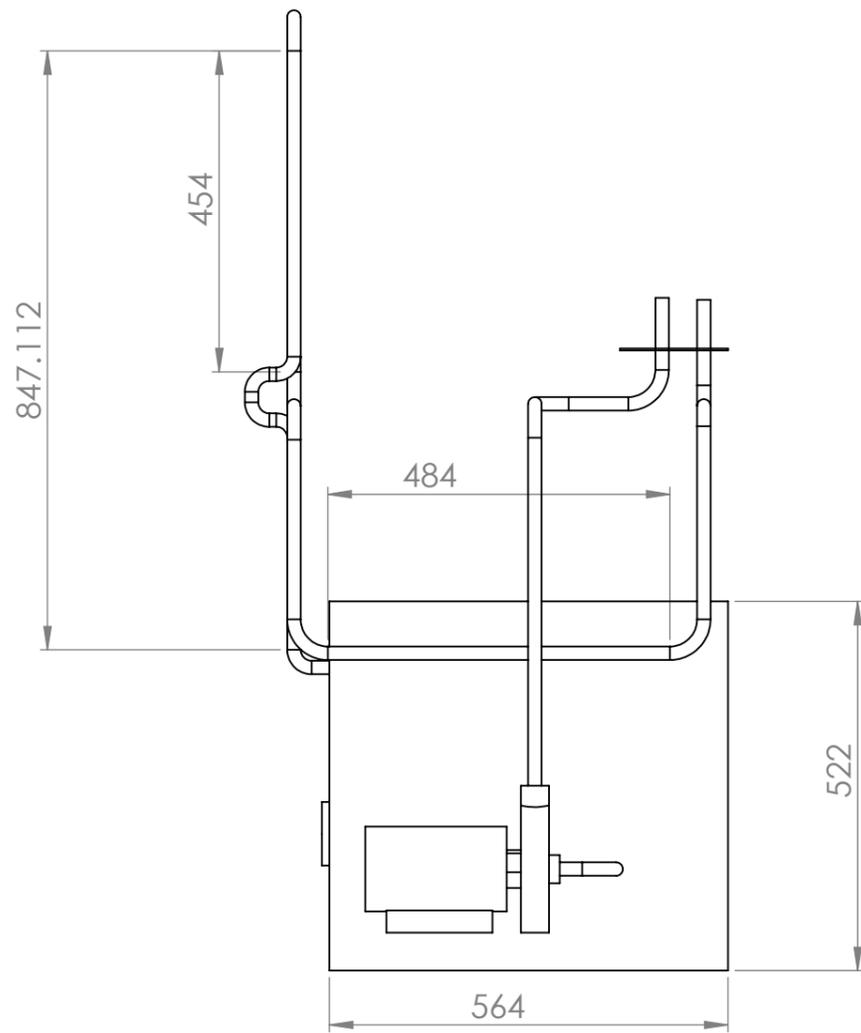
NO.	DESCRIPCION			MATERIAL INDICADA	CANT.
1	BOMBA			INDICADA	1
2	TUBOS			PLASTICO PVC	12
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE:	ESCALA:
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1:1
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO:	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				006	
SUSTITUYE A:					HOJA: 2/2

ISOMETRIA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

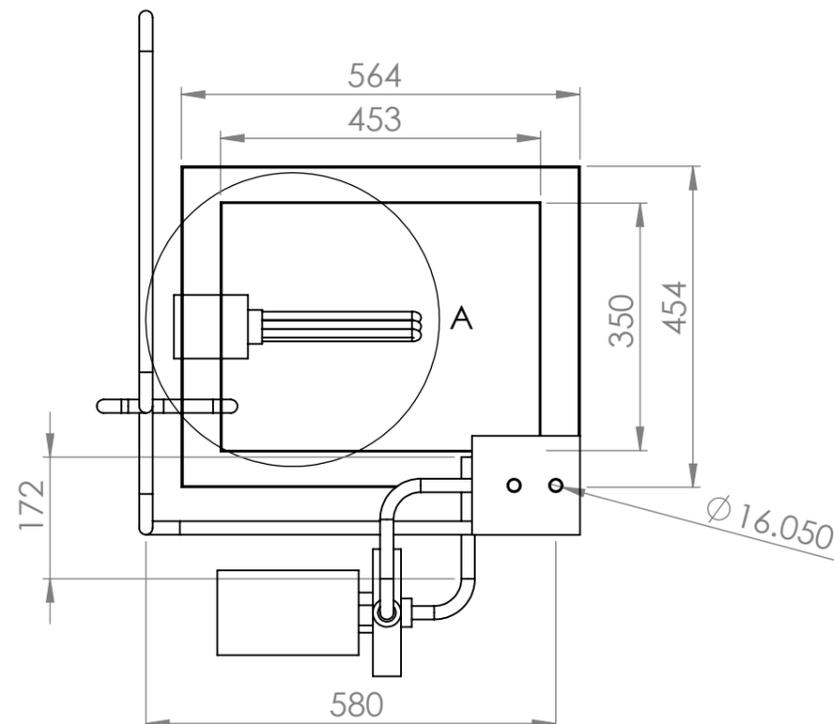


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: INDICADO	ESCALA: 1:10
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: 005	 HOJA: 1/2
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				SUSTITUYE A:	

SISTEMA DE CALENTAMIENTO

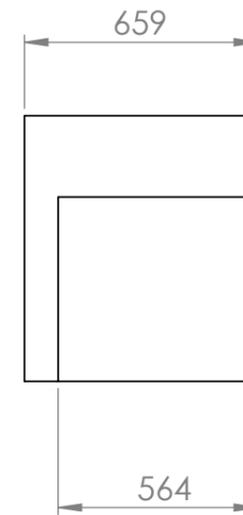
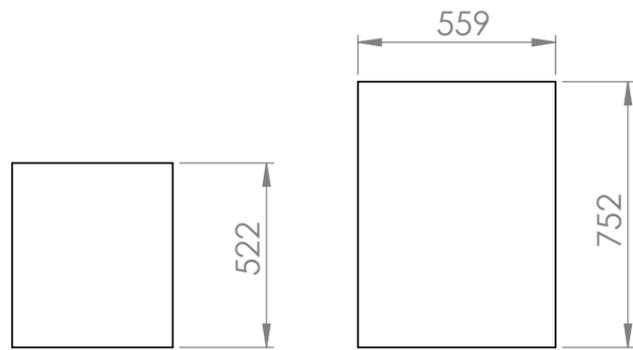
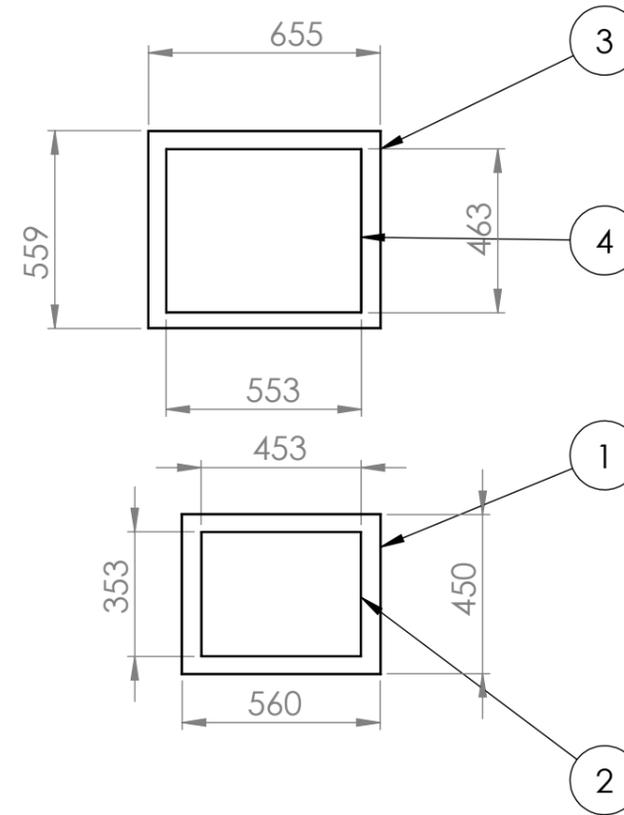
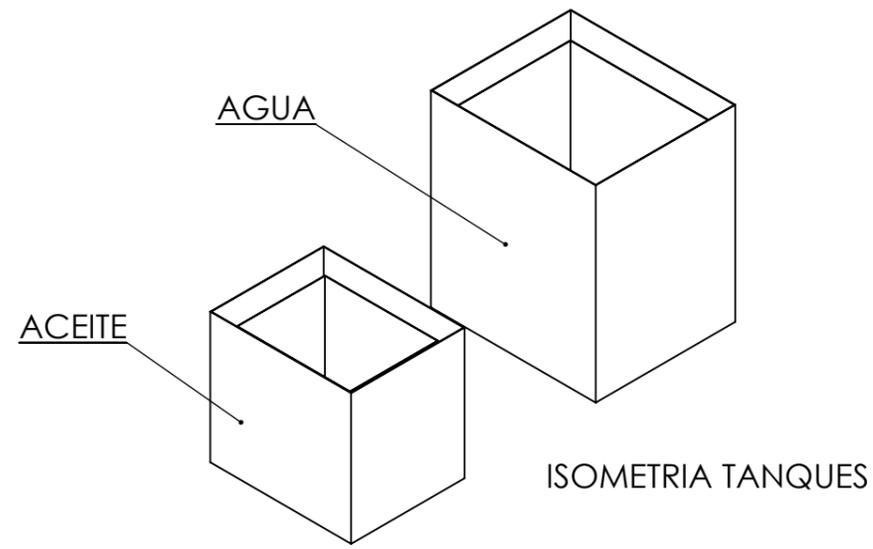


DETAIL A
SCALE 1 : 5



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		INDICADO	1
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: INDICADO	ESCALA: 1:10
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: 005	HOJA: 2/2
<p>ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA</p>				SUSTITUYE A:	

TANQUES DE ALMACENAMIENTO AGUA Y ACEITE



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	MATERIAL:	CANTIDAD:
PROYECTADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.		1 - 3 ACERO INOXIDABLE 2 - 4 TOL NEGRO	2
REVISADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CONTIENE: DETALLE I.C. MULTITUBOS	ESCALA: 1:20
DIBUJADO	2011-04-26	MEJÍA J./ PÉREZ F.			
APROVADO	2011-04-26	ING. SORIA / ING. ORDOÑEZ		CÓDIGO: 000	
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				SUSTITUYE A:	HOJA: 1/1

ANEXO J

Guías de prácticas del laboratorio

Adquisición de datos							
Tipo de I.C:				Tipo de Flujo:			
Temperatura °C				Caudal (litros/minuto)			Tiempo. (min)
#	Thi	Tho	Tci	Tco	Lado Caliente	Lado Frio	t
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Adquisición de datos							
Tipo de I.C:				Tipo de Flujo:			
Temperatura °C				Caudal (litros/minuto)			Tiempo. (min)
#	Thi	Tho	Tci	Tco	Lado Caliente	Lado Frio	t
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Firmas de responsabilidad.

Alumno

Docente

Nomenclatura:

Q_h	=	Calor transferido por el fluido caliente (Aceite)
Q_c	=	Calor transferido por el fluido frío (Agua)
Q_m	=	Calor transferido medio
$DMLT$	=	Diferencia media logarítmica de temperatura
Re_i	=	Número Reynolds fluido caliente (Aceite)
Re_o	=	Número Reynolds fluido frío (Agua)
f	=	Factor de fricción
Nu_o	=	Número de Nusselt (Agua)
Nu_i	=	Número de Nusselt (Aceite)
h_o	=	Coeficiente de transferencia de calor (Agua)
h_i	=	<i>Coeficiente de transferencia de calor (Aceite)</i>
U_o	=	<i>Coeficiente global de transferencia de calor analítico</i>
U_{ex}	=	<i>Coeficiente global de transferencia de calor experimental</i>
A	=	<i>área de transferencia de calor</i>
o	=	<i>subíndice salida del intercambiador</i>
r_1	=	<i>radio sin tomar en cuenta el espesor del tubo</i>
r_2	=	<i>radio tomando en cuenta el espesor del tubo</i>
μ	=	<i>viscosidad dinámica</i>
ν	=	<i>viscosidad cinemática</i>
U_o	=	<i>coeficiente global de transferencia de calor</i>
R_f	=	<i>factor de impureza</i>
R_w	=	<i>resistencia de conducción</i>
P	=	<i>presión</i>
V	=	<i>volumen</i>
ρ	=	<i>densidad</i>
m	=	<i>masa</i>
L_c	=	<i>longitud característica</i>
K_{cu}	=	<i>conductividad térmica del cobre</i>
K_{ac}	=	<i>conductividad térmica del acero</i>
d_o	=	<i>diámetro externo de los tubos</i>
d_i	=	<i>diámetro interno de los tubos</i>
D_e	=	<i>diámetro de la coraza</i>
C_p	=	<i>calor específico</i>

T_{hi}	=	<i>temperatura de entrada del fluido caliente</i>
T_{ci}	=	<i>temperatura de entrada del fluido frio</i>
T_{ho}	=	<i>temperatura de salida del fluido caliente</i>
T_{co}	=	<i>temperatura de salida del fluido frio</i>
M_h	=	<i>flujo másico del fluido caliente</i>
M_c	=	<i>flujo másico del fluido frio</i>
D_h	=	<i>diámetro hidráulico</i>
f	=	<i>factor de fricción</i>

1. OBJETIVOS

- Reconocer los intercambiadores de calor principios y aplicaciones.
- Conocer el funcionamiento de los intercambiadores de calor.
- Determinar las propiedades físicas y térmicas de los fluidos calo Portadores.
- Conocer la instrumentación y sus funciones del banco de pruebas.
- Adquirir datos y compararlos con los procesos analíticos.
- Analizar los resultados obtenidos gráfica y analíticamente.

2. ALCANCE

En el análisis de comparación de datos de esta práctica pretende conseguir el balance entre los resultados prácticos y analíticos para generar los porcentajes de eficiencias del banco de pruebas para intercambiadores de calos utilizando como fluidos de trabajo aceite con grados API y agua, los cuales serán transportados por el sistema de circulación por bombas desde los sistemas de calentamiento y refrigeración hasta los intercambiadores de calor.

2. MARCO TEORICO

3.1 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son equipos diseñados en la ingeniería para el intercambio de calor entre dos fluidos que poseen un gradiente de temperatura y se encuentran separados por una superficie sólida. Actualmente estos equipos son

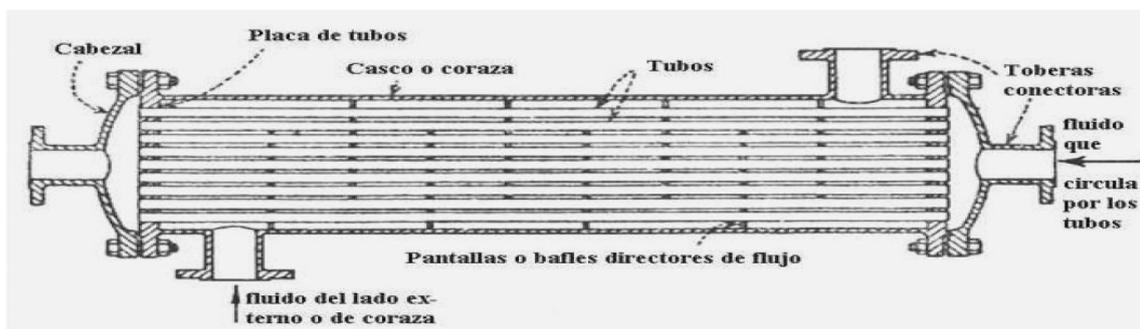
muy requeridos en bastantes aéreas como por ejemplo en la de refrigeración para lo que es acondicionamiento de aire (Calefacción y Aire acondicionado), también son usados en la industria automotriz (Radiadores) y en diversas aplicaciones físico-químicas. La mayor cualidad de los intercambiadores de calor es que permiten la transferencia de calor entre los fluidos sin que ellos se mezclen.

Es importante recalcar que en el intercambiador de calor la transferencia de calor suele ser por convección en cada fluido y por conducción a través del medio superficial que los separa es por eso que para el análisis de los intercambiadores de calor es conveniente trabajar con un coeficiente de transferencia de calor total “ U ” que toma en cuenta todos los procesos de transferencia.

3.2 Elementos y partes de un intercambiador de calor

Los elementos y partes de los intercambiadores de calor varían según el tipo de intercambiador de calor que vayamos a utilizar y la aplicación que queramos efectuar, pero en sí, las partes generalmente son iguales y a continuación se darán a conocer:

Tomaremos como ejemplo para explicar el Intercambiador de Calor de tubo y coraza el cual es usado cuando se requieren superficies grandes de transferencia de calor. El intercambiador de calor cuenta con las siguientes partes: cabezal, tubos, placa de tubos, coraza, toberas y deflectores. A continuación se ilustra una figura donde podremos observar sus partes respectivamente:



3.3 Tipos de intercambiadores de calor

Existen varias formas de clasificar a los intercambiadores de calor, una de ellas es por sus componentes como por ejemplo:

3. Tubos concéntricos
4. Tubos y coraza
5. De placas
6. Otra forma puede ser por el flujo:
7. Flujo paralelo
8. Flujo contracorriente
9. Flujo cruzado

También se puede considerar por el número de pasos (1 – 1, 1 – 2, 2 – 4, etc.)

4. CÁLCULOS GENERALES

4.1 ANÁLISIS DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

El objetivo del diseño de los intercambiadores de calor es que un ingeniero esté en la facultad de poder seleccionar un intercambiador de calor para lograr un cambio de temperatura específica y que también pueda predecir las temperaturas de los fluidos de entrada y de salida de dicho intercambiador de calor, en si el ingeniero debe ser capaz de lograr deducir el calor transferido q definiendo el coeficiente global de transferencia de calor, estableciendo las temperaturas de entrada y de salida al intercambiador y siempre tomando en cuenta si existen transferencia de calor insignificante entre el equipo y el medio ambiente así como también se debe tomar en cuenta los cambios de energías potencial y cinética, si tomando en todos los parámetros dichos nosotros realizamos un balance de energía podemos expresar las siguientes ecuaciones:

$$q = \dot{m}_h(i_{h,i} - i_{h,o}) \quad y \quad q = \dot{m}_c(i_{c,o} - i_{c,i})$$

Donde la entalpía de fluido la representamos con la letra i , los subíndices h y c se refieren a los fluidos caliente y frio y también tenemos los subíndices i,o que nos indica las condiciones de entrada y de salida del fluido.

Si los fluidos no presentan un cambio de fase y suponemos calores específicos constantes nuestra expresión se reduce a:

$$q = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad \text{y} \quad q = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})$$

Donde las temperaturas se denominan temperaturas medias del fluido en las posiciones que se encuentran. Es necesario tomar en cuenta que las ecuaciones descritas son independientes del arreglo del flujo y del tipo de intercambiador de calor. Se puede expresar de otra manera al relacionar la transferencia total de calor q con la diferencia de temperaturas ΔT entre el fluido caliente y el frío teniendo que:

$$\Delta T = T_h - T_c$$

Sin embargo como nosotros trabajamos con flujos que varían si son fríos y calientes según la posición del intercambiador debemos trabajar con una ecuación de la siguiente forma:

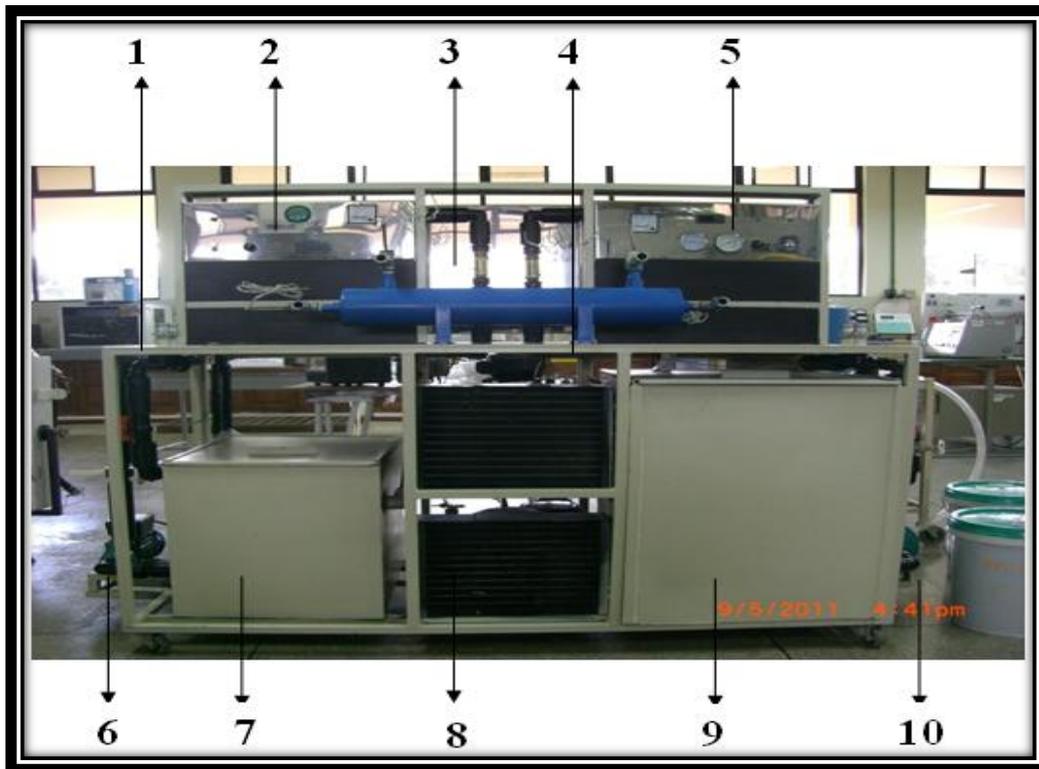
$$q = UA\Delta T_m$$

Donde ΔT_m es una diferencia de temperaturas media apropiada

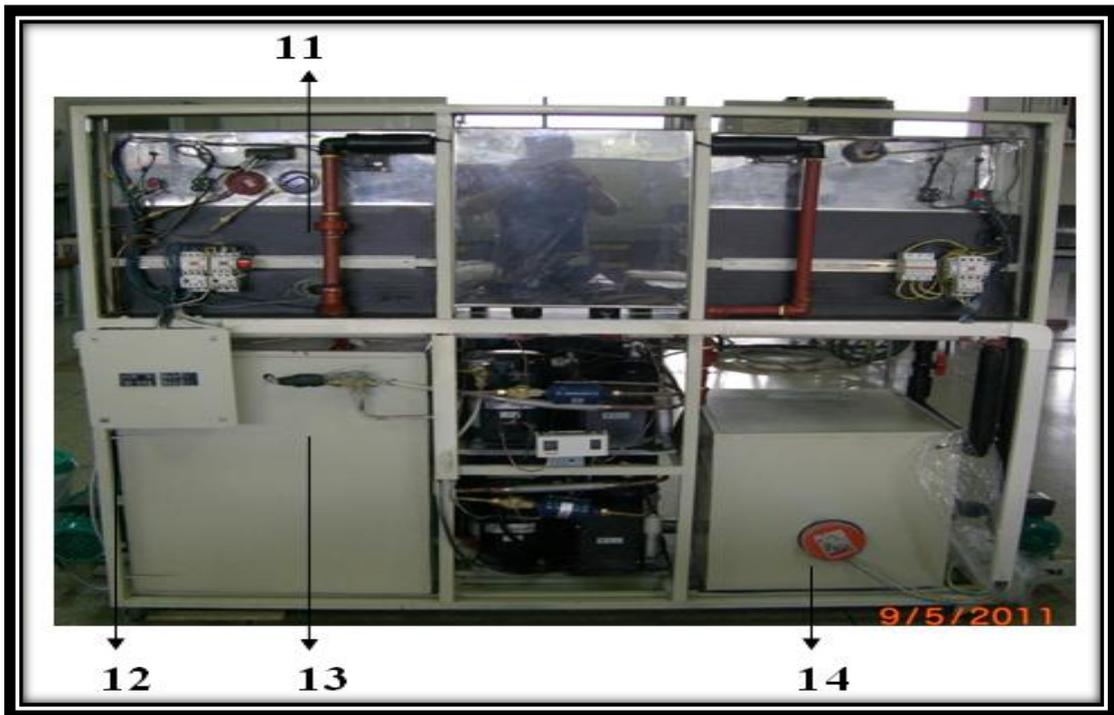
Existen dos métodos usados para el análisis de los intercambiadores de calor, el primero es el de la diferencia media logarítmica de temperatura (DMLT) y el segundo es el método de efectividad NUT.

5 EQUIPOS

5.1 IMAGEN Y PARTES DEL BANCO DE PRUEBAS



1. Acoples para manguera de presión de $\frac{3}{4}$ de pulgada
2. Panel de control lado caliente
3. Medidores de caudal (rotámetros)
4. Intercambiador de calor
5. Panel de control lado caliente
6. Bomba de aceite de $\frac{3}{4}$ de HP
7. Tanque de almacenamiento de aceite de acero reforzado
8. Unidades de refrigeración
9. Tanque de almacenamiento de agua de acero reforzado
10. Bomba de agua de 1 HP
11. de 1 HP



- 12. Tubería PVC de ¾ de pulgada
- 13. Caja de control eléctrico
- 14. Válvula de expansión
- 15. Resistencia eléctrica de 1.5kw/h

5.2 RANGOS DE OPERACIÓN:

FLUIFO	Caudal(Lpm)	Temperatura en el tanque (°C)
AGUA	10 --50	2--7
ACEITE	5 --30	55--65

5.3 CARACTERISTICA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

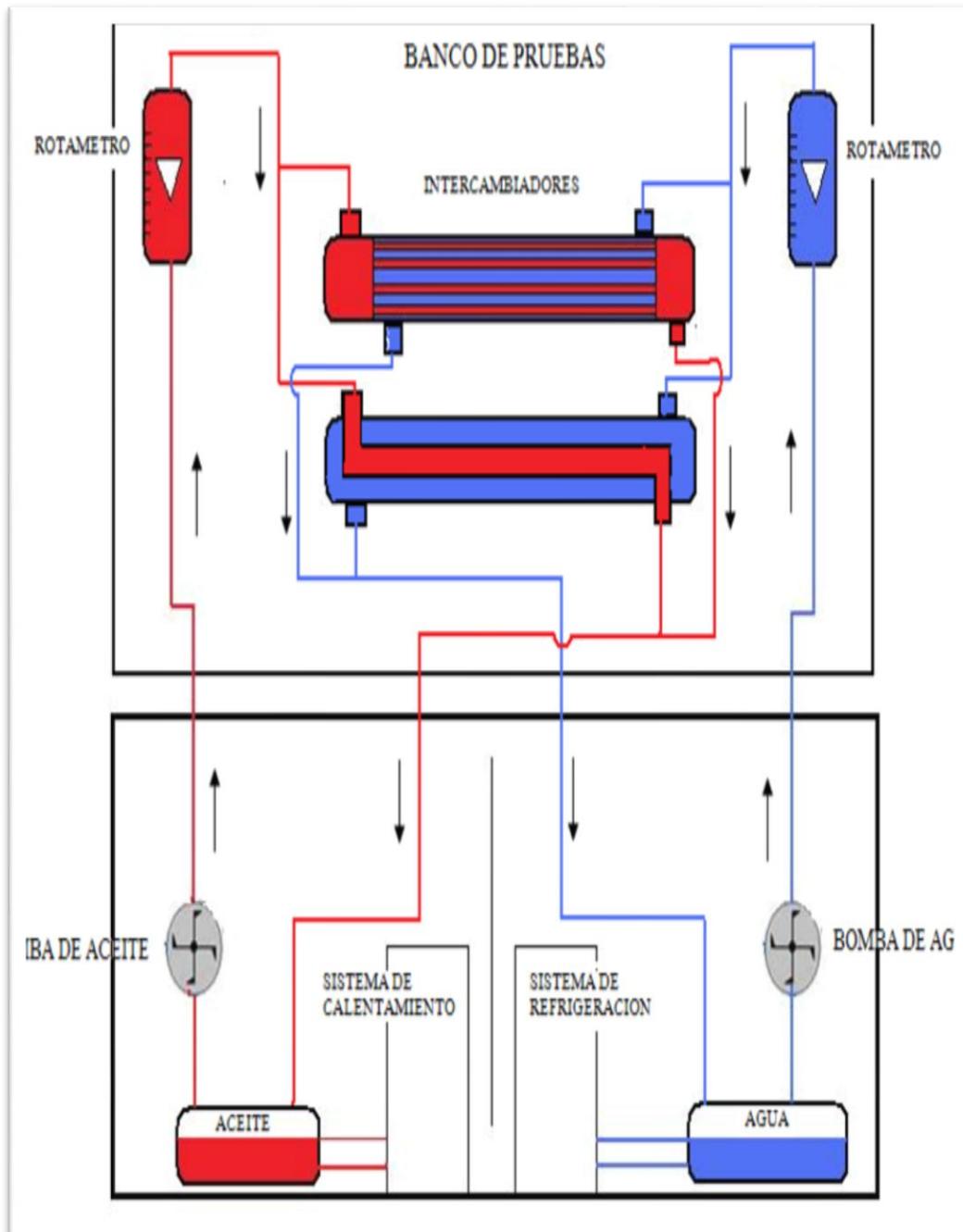
I.C. TUBO CONCENTRICO

NOMBRE	CÓDIGO	VALOR	UNIDAD
Conductividad térmica del cobre	kcu	401	W/m.°C
Diámetro interno tubo	do	0,0345	m.
Diámetro externo tubo	di	0,0315	m.
Diámetro externo coraza	De	0,1484	m.
Longitud de tubo	Le	0,41	m.

I.C. TUBO Y CORAZA (4 Tubos)

NOMBRE	CÓDIGO	VALOR	UNIDAD
Conductividad térmica del acero	kcu	80.2	w/m.°C
Diámetro interno tubo	do	0,019	m.
Diámetro externo tubo	di	0,017	m.
Diámetro externo coraza	De	0,127	m.
Longitud de tubo	Le	0,642	m.

5.4 ESQUEMA DEL BANCO DE PRUEBAS



6. PROCEDIMIENTO

6.1 Identificación de los equipos a utilizar

Este punto se refiere a que el alumno debe conocer con anterioridad cada uno de los equipos a ser utilizados para manipularlos de la mejor manera para que su uso sea seguro para el operador y para el cuidado del equipo

6.2 Preparación de sistemas

La preparación de los sistemas requiere su encendido con un tiempo antes a la iniciación de las prácticas para que los fluidos calo portadores lleguen a la temperatura requerida.

Sistema de refrigeración

En este sistema se tiene un interruptor encendido el cual se encuentra en el panel de control donde al cerrar el circuito comenzará el proceso de enfriamiento del fluido que se encuentra en el depósito de agua el cual por medio de un evaporador conectado al sistema de refrigeración de 6447.26 W. Genera un intercambio de calor entre el refrigerante R-134-A y el agua creando un banco de hielo para llegar a la temperatura del agua alrededor de 2°C temperatura requerida para ingresar al intercambiador de calor de este fluido.

Sistema de calentamiento

El sistema de calentamiento depende de una resistencia que se encuentra dentro del tanque de aceite sumergida completamente de 1.5 kW de potencia la cual se encargara de incrementar la temperatura por medio de conducción térmica por contacto a 60 °C, temperatura requerida para ingresar al intercambiador de calor y ser regularizada por un termostato que no permitirá que sobrepase el valor requerido.

6.3 Encendido del sistema de circulación

El sistema de circulación consta principalmente de bombas la cuales realizaran el proceso de movimiento del fluido por medio de la tubería desde los recipientes de almacenamiento de flujo hasta los intercambiadores de calor, de los cuales es muy importante hacer circular un minuto antes la bomba de circulación de agua que la del aceite ya que el flujo de mayor masa será el fluido frio.

7. ADQUISICIÓN DE DATOS

Después de tener estable los flujos por medio de los caudalímetros entonces podemos tomar los datos con una separación de tiempo de no más de 8 minutos para realizar la toma de 6 datos por situación en caso de mantener un fluido a caudal constante y variar el otro, esto se realizara para las cuatro situaciones:

- I.C. TUBO CONCÉNTRICO FLUJO PARALELO

Tubo concéntrico contra flujo.							
	ADQUISICIÓN DE DATOS						
	Temperatura °C				Flujo Másico kg/seg>		Tiempo. (min)
#	Thi	Tho	Tci	Tco	mh	mc	t
1							
2							
3							
4							
5							
6							

- I.C. TUBO Y CORAZA (4 Tubos) FLUJO PARALELO

MULTITUBO 4 Tubos flujo paralelo							
	ADQUISICIÓN DE DATOS						
	Temperatura °C				Flujo Másico kg/seg>		Tiempo. (min)
#	Thi	Tho	Tci	Tco	mh	mc	t
1							
2							
3							
4							
5							
6							

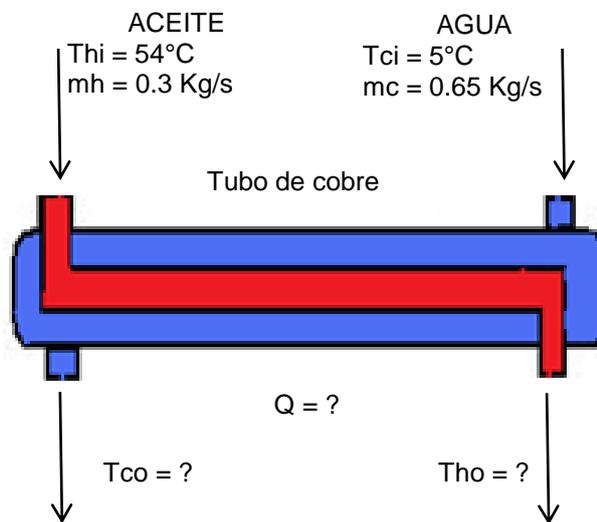
- I.C. TUBO CONCÉNTRICO CONTRA FLUJO

Tubo concéntrico contra flujo.							
	ADQUISICIÓN DE DATOS						
	Temperatura °C				Flujo Másico kg/seg>		Tiempo. (min)
#	Thi	Tho	Tci	Tco	mh	mc	t
1							
2							
3							
4							
5							
6							

- I.C. TUBO Y CORAZA (4 Tubos) CONTRA FUJO

MULTITUBO 4 Tubos flujo paralelo							
	ADQUISICIÓN DE DATOS						
	Temperatura °C				Flujo Másico kg/seg>		Tiempo. (min)
#	Thi	Tho	Tci	Tco	mh	mc	t
1							
2							
3							
4							
5							
6							

8. CALCULOS GENERALES



Cobre

$$K_{cu} = 401 \left(\frac{w}{m^{\circ}C} \right)$$

$$do = 0.0345 \text{ m} \quad ro = \frac{do}{2}$$

$$di = 0.0315 \text{ m} \quad ri = \frac{di}{2}$$

$$De = 0.1484 \text{ m} \quad Le = 0.41 \text{ m}$$

$$\text{Área} = do \cdot \pi \cdot Le$$

$$\text{Área} = 0.044 \text{ m}^2$$

$$Ao = \text{área}$$

Datos:

Fluido Frío

Agua

Fluido Caliente

Aceite

Calor Específico

$$Cpc = 4198 \text{ (J/Kg}^\circ\text{K)}$$

$$Cph = 2500 \text{ (J/Kg}^\circ\text{K)}$$

Densidad

$$\rho_c = 999.8 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_h = 884 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Viscosidad

$$\mu_c = 1.452 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\mu_h = 1.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Conductividad Térmica

$$kc = 0.58 \text{ (w/m}^\circ\text{K)}$$

$$kh = 1.41 \text{ (w/m}^\circ\text{K)}$$

Prandtl

$$Prc = 12.22$$

$$Prh = 2012$$

Temperaturas de entrada y flujo másico

$$Tci = 5^\circ\text{C}$$

$$Thi = 54^\circ\text{C}$$

$$mc = ?$$

$$mh = ?$$

$$Dh = De - do$$

$$Dh = 0.114$$

$$Reo = \left(\frac{4 \cdot mc}{\pi \cdot (De + di) \cdot \mu_c} \right)$$

$$Rei = \left(\frac{4 \cdot mh}{\pi \cdot di \cdot \mu_h} \right)$$

$$f = (0.790 \ln(Reo) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 64/Rei$$

Número Nusselt

$$Nu_o = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (Re_o - 1000) * Pr_c}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} * \left(Pr_c^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad Nu_i = 4.36$$

Coefficiente de transferencia de calor h

$$h_o = \left(\frac{kc * Nu_o}{Dh}\right) \quad h_i = \left(\frac{kh * Nu_i}{di}\right)$$

Coefficiente Global de Transferencia de Calor

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i \cdot h_i} + \frac{r_o \cdot R_{di}}{r_i} + \frac{r_o}{K_{cu}} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) + R_{do} + \frac{1}{h_o}}$$

Ecuaciones flujo de calor

$$1.- q_h = m_h \cdot C_{ph}(T_{hi} - T_{ho})$$

$$2.- q_c = m_c \cdot C_{pc}(T_{co} - T_{ci})$$

$$3.- Q_t = U_o \cdot A_o \cdot DMLT$$

$$4.- q_c = q_h = Q_t$$

$$5.- DMLT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

DMLT

Flujo Contracorriente

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co}$$

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci}$$

$$DMLT = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

Ecuación General de Intercambiadores de Calor

$$Q_1 = U_o \cdot A_o \cdot DMLT$$

9. TABLA DE RESULTADOS

Luego de tomar todos los datos respectivos en las diferentes situaciones los valoramos y analizamos los procesos energéticos de cada uno de ellos sacando las recomendaciones y conclusiones de cada caso.

Tubo y Coraza concéntrico paralelo

		TABULACIÓN DE RESULTADOS					
#	Qh	Qc	Qm	DMLT	Rei	Reo	f
1							
2							
3							
4							
5							
6							
	Nuo	Nui	ho	hi	Uo	Uex	% Error
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Tubo y Coraza concéntrico contra flujo

TABULACIÓN DE RESULTADOS							
#	Qh	Qc	Qm	DMLT	Rei	Reo	f
1							
2							
3							
4							
5							
6							
	Nuo	Nui	ho	hi	Uo	Uex	% Error
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Tubo coraza multitubo en flujo paralelo.

TABULACIÓN DE RESULTADOS							
#	Qh	Qc	Qm	DMLT	Rei	Reo	f
1							
2							
3							
4							
5							
6							
	Nuo	Nui	ho	hi	Uo	Uex	% Error
1							
2							
3							
4							
5							
6							

Tubo coraza multitubo en contraflujo.

TABULACIÓN DE RESULTADOS							
#	Qh	Qc	Qm	DMLT	Rei	Reo	f
1							
2							
3							
4							
5							
6							
	Nuo	Nui	ho	hi	Uo	Uex	% Error
1							
2							
3							
4							
5							
6							

10. Gráficas de comportamiento

11. Conclusiones y recomendaciones

ANEXOS

FÓRMULAS GENERALES

- DIFERENCIA DE TEMPERATURAS

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

- NUMERO DE REYNOLDS

$$Re_i = \left(\frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu} \right)_i$$

- PRANDTL

$$Pr_i = \frac{\mu * Cp}{k}$$

- NUSSELT

$$Nu_o = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) * (Re_o - 1000) * Pr_c}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} * \left(Pr_c^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

- COEFICIENTE GLOAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

$$U = \frac{1}{\frac{1}{hi} + \frac{ri}{k_{cu}} * Ln\left(\frac{D_{ext}}{D_{int}}\right) + \frac{D_{int}}{D_{ext}} * \frac{1}{ho}}$$

- COEFICIENTE DE CONVECCIÓN

$$h_i = \frac{Nu_i * k}{D_i}$$

- FLUJO DE CALOR

$$\dot{Q} = \dot{m} * Cp * \Delta T$$

- ECUACIÓN GENERAL DE I.C

$$Q = A_0 * h_0 * (T_2 - T_{m_0})$$

- CÁLCULO DEL DMLT

$$DMLT = \frac{\Delta T_{ENTRADA} - \Delta T_{SALIDA}}{Ln\left(\frac{\Delta T_{ENTRADA}}{\Delta T_{SALIDA}}\right)}$$

ANEXO K

MANUAL DE USUARIO

MANUAL DE USUARIO

**BANCO DE PRUEBAS
PARA ACEITE API Y AGUA EN INTERCAMBIADORES DE CALOR**

Lea atentamente las instrucciones de este manual y sus instrucciones de seguridad

INDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	4
2. Objetivo.....	5
3. Descripción del equipo.....	5
4. Esquema del banco de pruebas e intercambiadores de calor.....	9
5. Encendido.....	11
6. Sistema de Calentamiento.....	12
7. Sistema de Enfriamiento.....	12
8. Bombas de Circulación.....	13
9. Toma de Datos.....	16
10. Seguridad General.....	16
11. Mantenimiento.....	17
12. Instrumentación.....	17

1. Introducción

Este banco de prueba es básicamente la interacción de componentes para utilizarlo como instrumento de aprendizaje para estudiantes del DECEM de la ESPE el cual será una ayuda para el laboratorio de Conversión de la Energía ya que actualmente solo se cuenta con intercambiadores de calor (I.C.) agua – agua, y en este nuevo banco se complementará con prácticas de aceites API y agua donde el estudiante podrá identificar sus elementos tales como bomba de aceite, bomba de agua, intercambiadores de calor, sistema de refrigeración y calentamiento, medidores de caudal y temperatura además toda su instrumentación requerida, también se reconocerá los procesos de refrigeración y calentadores por resistencias, identificando sus propiedades termodinámicas de una manera práctica.

Los intercambiadores de calor realizan la transferencia de energía térmica por medio de dos fluidos sean estos líquidos o gaseosos los cuales se encuentran separados por diferentes materiales sin mezclarse, a lo largo de la historia los intercambiadores han ido cambiando sus diseños para satisfacer las necesidades de la sociedad entre los sistemas térmicos y mecánicos, donde su uso más común es el radiador de los vehículos, en el cual el agua es enfriada por medio de aire proporcionado por un ventilador que pasa por el radiador para enfriar el agua que fue calentada por la combustión del motor y la fricción de las partes. También en sistemas de refrigeración, calderas, hornos, refinerías entre otros.

Además dentro de la ingeniería mecánica, una de las ramas más importantes es la de los hidrocarburos, siendo indispensable el estudio y conocimiento de los diferentes tipos de intercambiadores de calor para los procesos de extracción, destilación y refinado del petróleo.

2. Objetivo

Disponer de un banco de pruebas de intercambiadores de calor donde sus fluidos calo portadores serán aceites de diferentes grados API y agua.

Investigar el comportamiento de diferentes tipos de aceites API en los I.C.

3. Descripción del equipo

El equipo consta de algunos componentes que para cada sistema anexo al mismo



Figura K.1 Banco de Pruebas

El banco de pruebas para intercambiadores de calor aceite-agua en flujo paralelo y contraflujo está compuesto por los siguientes sistemas y partes principales:

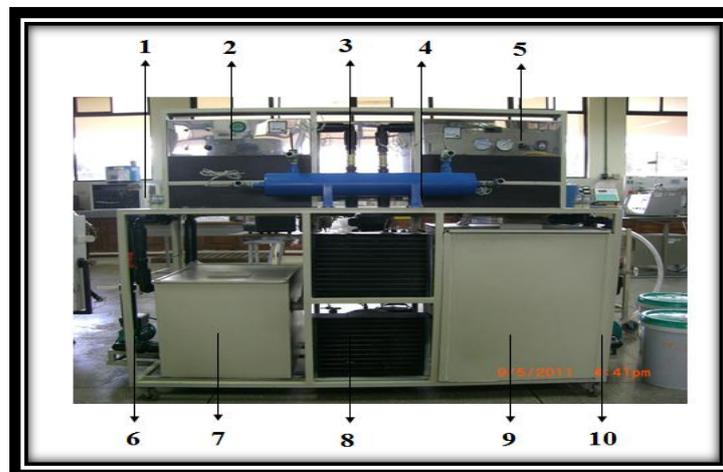


Figura K.2 Partes principales del Banco de Pruebas

1. Acoples para manguera de presión de $\frac{3}{4}$ de pulgada
2. Panel de control lado caliente
3. Medidores de caudal (rotámetros)
4. Intercambiador de calor
5. Panel de control lado caliente
6. Bomba de aceite de $\frac{3}{4}$ de HP
7. Tanque de almacenamiento de aceite de acero reforzado
8. Unidades de refrigeración
9. Tanque de almacenamiento de agua de acero reforzado
10. Bomba de agua de 1 HP



Figura K.3 Partes posteriores del Banco de Pruebas

11. Tubería PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada
12. Caja de control eléctrico
13. Válvula de expansión
14. Resistencia eléctrica de 1.5kw/h

Instalaciones eléctricas e instrumentación

Se ha instalado la instrumentación necesaria para su óptimo funcionamiento. A continuación se dará a conocer cada elemento y su descripción.

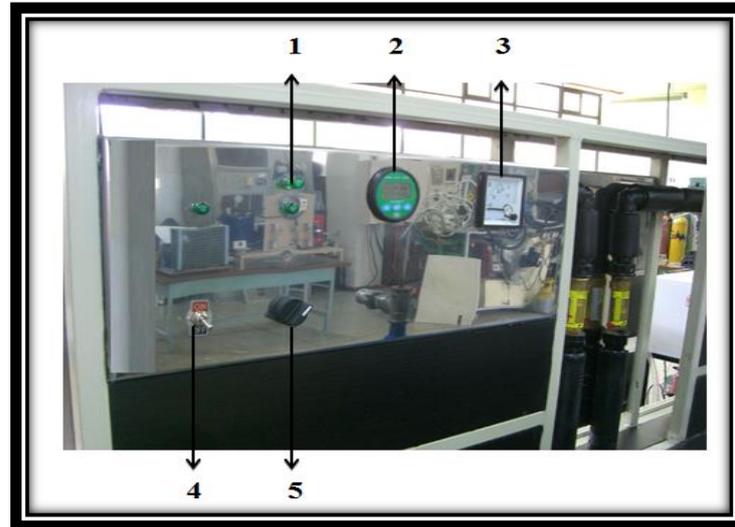


Figura K.4 Partes del panel izquierdo del Banco de Pruebas

1. Leds de control de encendido
2. Control digital de temperatura para el aceite
3. Amperímetro para la resistencia eléctrica
4. Switch de encendido y apagado de la resistencia
5. Switch de encendido y apagado de la bomba de aceite

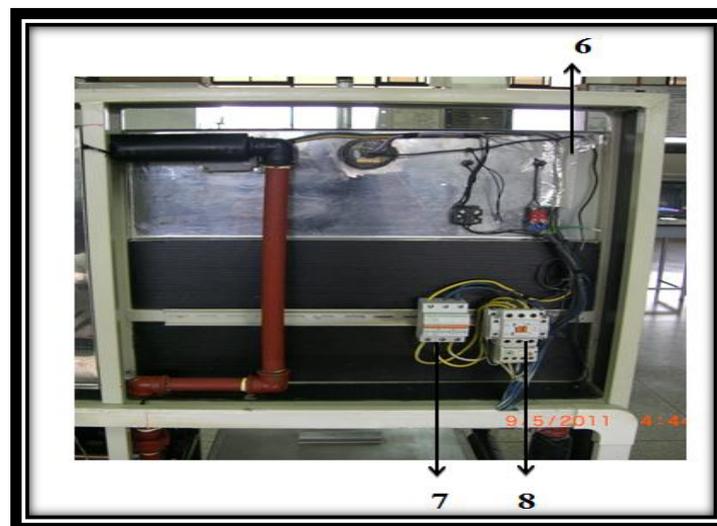


Figura K.5 Partes eléctricas del Banco de Pruebas

6. Cable flexible número 10, 12 y 18
7. Breaker trifásico
8. Relé de protección térmica

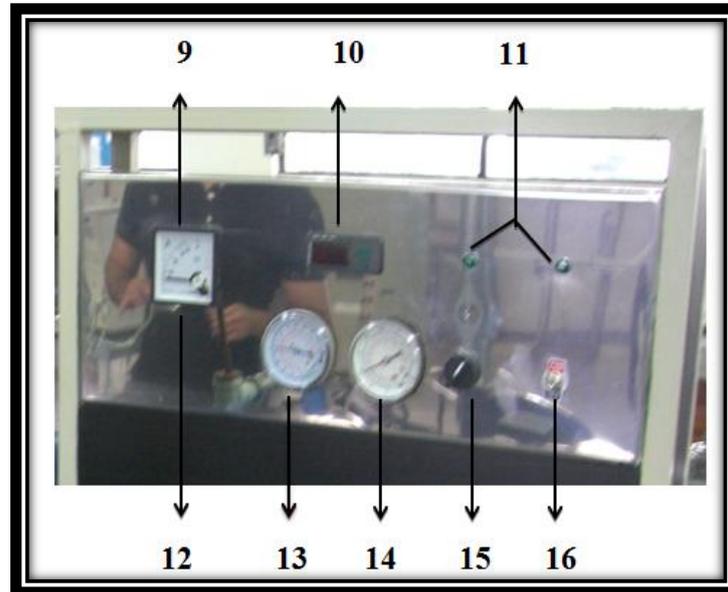


Figura K.6 Partes del panel derecho del Banco de Pruebas

9. Amperímetro para los sistemas de refrigeración
10. Control digital de temperatura para el agua
11. Leds de control de encendido unidades de refrigeración y bomba de agua
12. Amperímetro para los sistemas de refrigeración
13. Manómetro para la unidad 1 de refrigeración
14. Manómetro para la unidad 2 de refrigeración
15. Switch de encendido y apagado de la bomba de agua
16. Switch de encendido y apagado de las unidades de refrigeración

4. Esquema del banco de pruebas e Intercambiadores

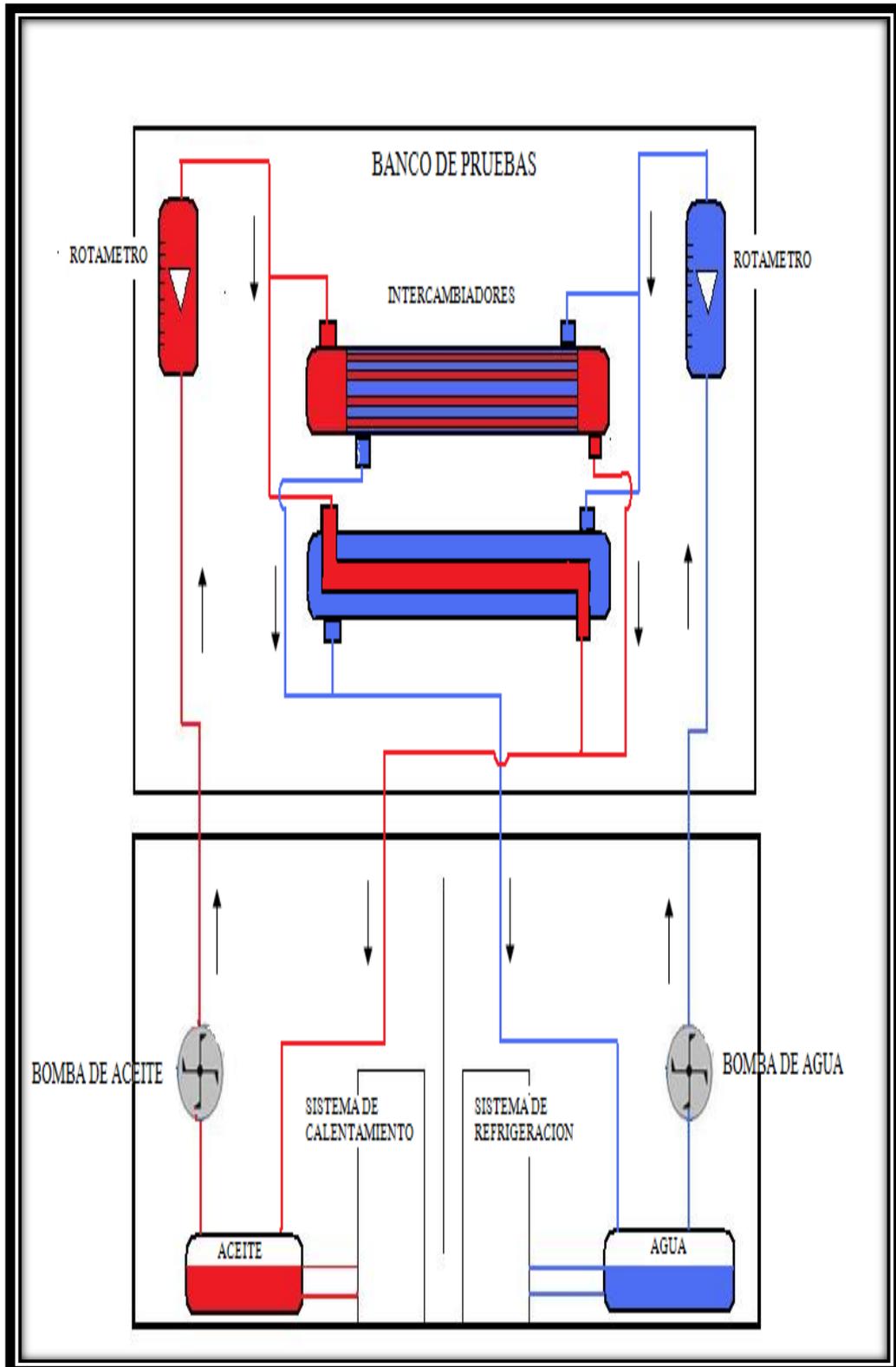


Figura K.7 Esquema del Banco de Pruebas

Este banco consta con dos intercambiadores de calor desmontables de coraza y tubos.

- Tubo concéntrico
- 4 Tubos y coraza

RANGOS DE OPERACIÓN:

Tabla K.1 Rangos de operación

FLUIFO	Caudal(Lpm)	Temperatura en el tanque (°C)
AGUA	10 --50	2--7
ACEITE	5 --30	55--65

CARACTERISTICA DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

- I.C. TUBO CONCENTRICO

Tabla K.2 Características técnicas del I.C tubo concéntrico

NOMBRE	CODIGO	VALOR	UNIDAD
Conductividad térmica del cobre	kcu	401	W/m.°C
Diámetro interno tubo	do	0,0345	m.
Diámetro externo tubo	di	0,0315	m.
Diámetro externo coraza	De	0,1484	m.
Longitud de tubo	Le	0,41	m.

- I.C. TUBO Y CORAZA (4 Tubos)

Tabla K.3 Características técnicas del I.C multitubo

NOMBRE	CODIGO	VALOR	UNIDAD
Conductividad térmica del acero	kcu	80.2	w/m.°C
Diámetro interno tubo	do	0,019	m.
Diámetro externo tubo	di	0,017	m.
Diámetro externo coraza	De	0,127	m.
Longitud de tubo	Le	0,642	m.

5. Encendido

Para el encendido de los sistemas, los mando e interruptores se encuentran en todo el panel frontal con señales claras de cada uno de ellos que se describirán a continuación

Indicador de encendido de la del sistema.

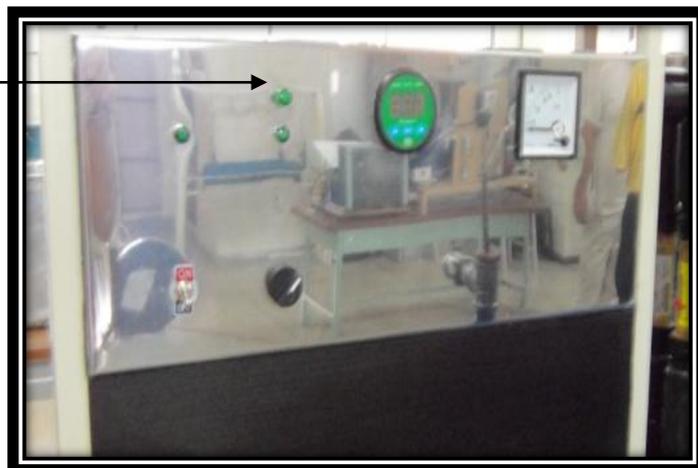


Figura K.8 Indicador de encendido del sistema

6. Sistema de Calentamiento

El sistema de calentamiento consta de un termostato que se encuentra dentro de la resistencia el cual permite mantener estable la temperatura que se desee.

El encendido se realiza por medio de un interruptor que se encuentra en el panel frontal del banco como se señala posteriormente.

Interruptor de encendido del sistema de calentamiento

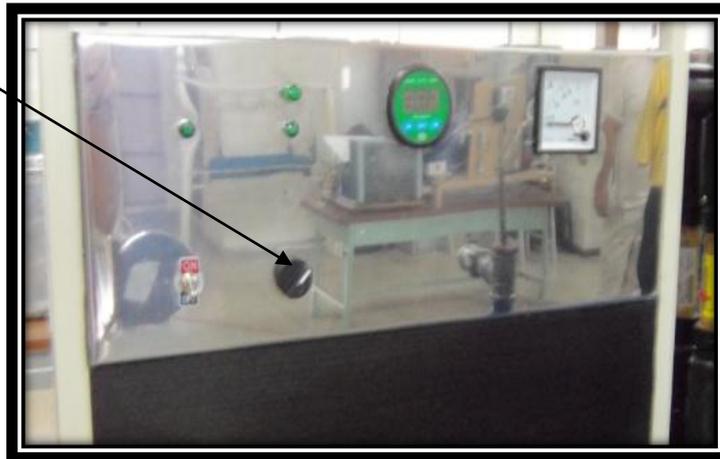


Figura K.9 Encendido del sistema de calentamiento

7. Sistema de Enfriamiento

Para encender el sistema de refrigeración se necesita poner en contacto el interruptor que se encuentra en el lado izquierdo del panel como se señala posteriormente.

Interruptor de encendido de los sistemas de refrigeración



Figura K.10 Encendido del sistema de refrigeración

8. Bombas de Circulación

Una vez que los sistemas de calentamiento y de enfriamiento ya estén a la temperatura requerida se encienden las bombas se serán la encargadas de llevar los fluidos a los intercambiadores de calor.

El encendido de cada bomba se encuentra en el panel como se indica posteriormente.



Figura K.11 Encendido de las Bombas

8.1 Bomba circulación de agua 1.0 HP

Seguridad

 Al ver este símbolo de alerta de seguridad esté atento a posibles heridas personales.

 **PELIGRO.** Este símbolo advierte peligros que producirán lesiones graves, muerte o daños materiales considerables si se ignoran.

 **ADVERTENCIA.** Este símbolo advierte peligros que pueden producir lesiones graves, muerte o daños materiales considerables si se ignoran.

 **PRECAUCION.** Este símbolo advierte peligros que provocarán o podrán producir lesiones graves, muerte o daños materiales considerables si se ignoran.

Seguridad Eléctrica

 Conecte el motor a tierra antes de conectar en suministro de corriente eléctrica y el cableado debe cumplir con todas las normas correspondientes.

 **ADVERTENCIA.** La tensión del capacitor puede ser peligrosa, para descargarlo tome un destornillador que tenga su mango aislado, no toque la hoja del metal del destornillador ni de los bornes del capacitor. En caso de dudas, consulte a un electricista competente.

 **PRECAUCION.** No toque el motor en operación este puede causar quemaduras deje pasar por lo menos 20 minutos antes de su manipulación, use gafas de seguridad e inspeccione la bomba visualmente antes de ponerla a trabajar.

 **ADVERTENCIA.** El cuerpo de la bomba puede explotar si sobrepasa los niveles de presión mantenga la presión por debajo de 70 PSI.

Mantenimiento

Para el caso de lubricación interna de la bomba consta de aceite lubricante que durará toda la vida útil de los cojinetes y su enfriamiento es por agua. El motor tiene un protector de sobrecarga térmica que se reposición automáticamente.

 **PRECAUCION.** No ponga a funcionar la bomba en seco puede causar recalentamiento y daño a los sellos.

Para mayor información sobre el uso de la bomba véase el manual de usuario bomba centrífuga MYERS.

Bomba circulación de aceite 0.75 HP

Seguridad

 Al ver este símbolo de alerta de seguridad esté atento a posibles heridas personales.

 **PELIGRO.** Este símbolo advierte peligros que producirán lesiones graves, muerte o daños materiales considerables si se ignoran.

 **ADVERTENCIA.** Este símbolo advierte peligros que pueden producir lesiones graves, muerte o daños materiales considerables si se ignoran.

 **PRECAUCION.** Este símbolo advierte peligros que provocarán o podrán producir lesiones graves, muerte o daños materiales considerables si se ignoran.

Seguridad Eléctrica

 Conecte el motor a tierra antes de conectar en suministro de corriente eléctrica y el cableado debe cumplir con todas las normas correspondientes.

 **ADVERTENCIA.** La tensión del capacitor puede ser peligrosa, para descargarlo tome un destornillador que tenga su mango aislado, no toque la hoja del metal del destornillador ni de los bornes del capacitor. En caso de dudas, consulte a un electricista competente.

 **PRECAUCION.** No toque el motor en operación este puede causar quemaduras deje pasar por lo menos 20 minutos antes de su manipulación, use gafas de seguridad e inspeccione la bomba visualmente antes de ponerla a trabajar.

 **ADVERTENCIA.** El cuerpo de la bomba puede explotar si sobrepasa los niveles de presión mantenga la presión por debajo de 50 PSI.

Mantenimiento

Para el caso de lubricación interna de la bomba consta de aceite lubricante que durará toda la vida útil de los cojinetes y su enfriamiento es por agua. El motor tiene un protector de sobrecarga térmica que se reposición automáticamente.

 **PRECAUCION.** No ponga a funcionar la bomba en seco puede causar recalentamiento y daño a los sellos.

Para mayor información sobre el uso de la bomba véase el manual de usuario bomba periférica MYERS.

9 Toma de Datos

Los datos son tomados directamente por el medidor de temperatura de varias salidas cada 5 minutos para conseguir las temperaturas de entrada y salida de los fluidos.

Los datos de caudal son impuestos visualmente por medio de los rotámetros que se encuentran en el centro del panel frontal

10 Seguridad General

Para el encendido de los sistemas se requiere supervisión del encargado del laboratorio.

 **PRECAUCION.** Mantenga a los visitantes a una distancia segura a las áreas de trabajo.

El aceite no debe exceder las temperaturas de 60 grados centígrados porque esto podría causar cambios inestables en este fluido.

El sistema de refrigeración puede tener fugas de refrigerante se debe hacer un revisión de la carga cada vez que se realice las pruebas.

Tener en cuenta que la resistencia estará usando energía eléctrica de 220 V no se debe manipular sin supervisión del encargado del laboratorio.

10 Mantenimiento

Para el mantenimiento de cada uno de los componentes esta detallado anteriormente, para sus partes expuestas es muy importante limpiar el banco de pruebas después de cada uso, en caso de aceite en sus componentes usar limpiadores de material de tela absorbente.

Se recomienda realizar el cambio de los fluidos calo portadores por lo menos una vez cada año en el caso del agua y una vez cada dos años en el caso del aceite, esto debido a que por la utilización del equipo los fluidos van perdiendo sus propiedades físicas y químicas y los resultados empezaran a ser inexactos.

11 Instrumentación

Especificaciones técnicas de los medidores de caudal.



Figura K.12 Partes del caudalímetro

Introducción

La serie EZ-View medidor de flujo es muy durable y de bajo costo industrial, por su lectura directa en esta clase medidor de flujo y que es simple de instalar. Puede ser montado (instalado) en cualquier posición de vertical u horizontal. Construido de material resistente a alto impacto de plástico polisulfona, ofrece integridad estructural y la excelente composición química compatibilidad con una amplia gama de productos químicos industriales.

Ver el flujo de metros EZ proporcionar instantánea lectura de la frecuencia de medición, de caudal de líquidos en recipientes cerrados y en sistemas de tuberías, permite la inspección visual del estado líquido como así como la visualización del indicador de flujo interno en relación con un flujo calibrado a escala.

No requieren conexiones eléctricas para la operación, y proporcionar la medida mediante la creación de presión diferencial predecible a través de un resorte que se encuentra en el conjunto del pistón.

Principio De Funcionamiento

La serie EZ-View medidor de flujo es una variable de tipo pistón área metro de flujo que utiliza un orificio anular de bordes afilados, formado entre un pistón de centro abierto y una cono de medición cónico.

El pistón se mantiene en un "no flujo" posición en la base del cono por una retención de un resorte de precisión.

Como el flujo en la tubería aumenta, el diferencial en consecuencia aumenta la presión en el pistón orificio, y se mueve el pistón y el indicador de flujo en contra del resorte.

Cuanto mayor es el caudal, más el pistón mueve a lo largo del cono de medición cónico.

La tasa de flujo se mide al ver el anillo indicador rojo, montado en el pistón, en relación con una escala graduada situada flujo en el cuerpo del medidor de flujo transparente.

El diseño único permite que el medidor de EZ-View puede ser instalado en cualquier dirección-horizontal, vertical, de arriba abajo, etc., sin sacrificar el rendimiento de medición, los flujo de alisadores, ubicado en la entrada y salida, permitir que el medidor de flujo a ser menos sensibles a las turbulencias condiciones de flujo.

Mediciones de líquidos se proporcionan en GPM (galones por minuto) y LPM (litros por minuto).

Especificaciones

Tabla K.4 Descripción y especificaciones de los caudalímetro

Descripción	Especificaciones
Precisión	± 5% de la escala completa
Repetitividad	± 1%
Grado de la presión	325 psi (22,4 bar) máxima
Rango de temperatura	32 ° F a 250 ° F (0 ° C a 121 ° C)
Tipo 1 accesorios de PVC	ASME ANSI B1.20.1 NPT
	BSPT ISOR7
	BSPP ISO228
Materiales (mojado):	Polisulfona
	Cono polisulfona
	Primavera T300 de acero inoxidable
	Anillos de retención de acero inoxidable PH15-7mo
	Juntas de Buna-N

	Indicador de timbre Buna-N
Indicadores	Límite de polipropileno
	Imán de ferrita de estroncio
Materiales (no mojada)	Indicador de polipropileno
	Escala de poliéster
Calibración de fluidos	
Aceite de 0.871 gravedad específica	Viscosidad 32 cSt
El agua 1.0 gravedad específica	Viscosidad 1,0 cSt

Instalación

El medidor de flujo es un dispositivo fácil de instalar. Sin embargo, las siguientes medidas son recomendadas para confiable, un funcionamiento sin problemas:

No - Permita que el sellador tubo de líquido entre en contacto con el medidor de flujo de plástico. La mayoría de selladores de tuberías contienen solventes que no son compatibles con polisulfona plástico y se traducirá en el debilitamiento cuerpo del medidor de flujo y potencialmente fractura bajo presión. Si un sellador de tuberías se requiere, el uso de cinta de Teflón ® es recomendado.

No - Instale el medidor de flujo en sistemas de tuberías que no están alineadas o un buen poyo.

No - Conecte el medidor de flujo macho NPT de plástico a la hembra acoplamiento de metal TNP. Las diferencias en los coeficientes de dilatación entre los metales y plásticos pueden hacer que el cuerpo del medidor de flujo de plástico se agriete. Utilizar un acoplamiento de tuberías de plástico de mujer a mujer a tubo de metal para conectar el medidor de flujo de plástico.

No - Utilizar llaves de tubo en el cuerpo del medidor de flujo. Para evitar las cicatrices o dañar el exterior superficie, utilice una llave de extremo abierto en el hexagonal integral pisos durante la instalación.

No - Reservado el medidor de flujo de contrapresión o fluir de nuevo. El medidor de flujo funcionará como un "fugas" válvula de retención cuando se someten a la corriente contraria, pero puede ser dañado si la potencia hidráulica inversa es demasiado grande.

No - Instale el medidor de flujo en sistemas con grandes grados de contaminación por partículas. Mínimo de filtración de 200 mallas (74 micras) se recomienda para un funcionamiento sin problemas.

No - Instale las juntas cónicas que no han sido lubricadas.

Mantenimiento

EZ-Ver los medidores de flujo están diseñados para proporcionar muchos años de servicio con poca o ninguna necesidad de mantenimiento. La limpieza periódica puede ser requerida.

- Limpie el exterior del medidor de flujo con desnaturalizados el alcohol o un detergente suave y agua tibia.
- Si el interior del medidor de flujo se ve opaco, se puede desmontar para su limpieza.
- Si el medidor de flujo se atascan con partículas, el medidor se requieren desmontaje el pistón debe ser expulsado del lado de la entrada en la salida y limpie los componentes internos.