



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

**MANUAL DE OPERACIÓN DE UNA CUBA TÉRMICA Y ESTUDIO DE LA
TRANSFERENCIA DE CALOR DE UNA SALMUERA**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

FERNANDO ESQUIVEL ZEMPOALTECA

DIRIGIDO POR:

M.C.Q. EDUARDO MARTIN DEL CAMPO LÓPEZ

DRA. SANDRA LUZ MARTÍNEZ VARGAS

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO

“No importa lo lento que vayas mientras no te detengas.”

Confucio (551 a.C-479 a. C)

DEDICATORIA

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO.....	14
1.1 OPERACIONES UNITARIAS.....	15
1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR	16
1.2.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	16
1.2.2 RECIPIENTES ENCHAQUETADOS	19
a) RECIPIENTES SIN AGITACIÓN	19
b) RECIPIENTES CON AGITACIÓN MECÁNICA	19
c) SERPENTÍN SUMERGIDO	20
d) CALENTAMIENTO CON RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	20
1.2.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR	21
a) INTERCAMBIADORES DE DOBLE TUBO.	22
b) INTERCAMBIADORES DE TUBOS Y CORAZA.....	22
c) INTERCAMBIADORES COMPACTOS.....	24
1.2.4 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN EN INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	24
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	30
OBJETIVOS	31
OBJETIVO GENERAL.....	31
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	31
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	32
En este capítulo se expone la justificación de la importancia y el propósito del desarrollo de esta tesis en función del contexto académico e industrial para la formación del ingeniero químico.....	33
2.1 JUSTIFICACIÓN.....	33
2.2 DESARROLLO	34
CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	58
3.1 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN DEL EQUIPO	59
3.2 PRUEBAS EN LA CUBA TÉRMICA CON AGUA.....	59
3.2.1 CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE.....	61
3.2.2 CALEFACCIÓN POR CIRCULACIÓN EXTERNA	62

3.2.3 CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE	64
3.2.4 CALEFACCIÓN POR SERPENTIN.....	66
3.2.5 ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA.....	68
3.2.6 ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	70
3.2.7 ENFRIAMIENTO POR SERPENTIN Y VÁLVULA DE MEZCLA	73
3.2.8 ENFRIAMIENTO POR SERPENTIN E INTERCAMBIADOR DE CALOR	75
3.3.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE CONTROL Y VARIABLES DE RESPUESTA	78
3.3.2 MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CUBA TÉRMICA.....	79
3.3.3 PROPUESTA DE PRÁCTICA	112
3.3.4 SOLUCIÓN ACUOSA DE NaCl al 5%	112
3.3 RESULTADOS DE LA PRÁCTICA PROPUESTA	113
3.3.1 CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE	113
3.3.2 ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR.....	122
3.3.4 CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN.....	129
3.3.5 ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR	134
CONCLUSIONES.....	143
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
ANEXOS.....	148
ANEXO I. CARACTERIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DEL GRUPO	148
ANEXO II. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LA PALETA DEL AGITADOR	157

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN (KERN, 1992)	17
FIG. 1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN (DOMÍNGUEZ, 2014).....	18
FIG. 1.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN (DOMÍNGUEZ, 2014).....	19
FIG.1.4 RECIPIENTE ENCHAQUETADO (THE CHEMICAL BATCH REACTOR, SPRINGER, 2011).....	20
FIG. 1.5 RECIPIENTE CON SERPENTÍN SUMERGIDO (THE CHEMICAL BATCH REACTOR, SPRINGER, 2011) .	20
FIG. 1.6 INTERCAMBIADOR DE CORAZA Y TUBOS (CENGEL, 2007)	23
FIG. 1.7 DEFLECTORES (JARAMILLO, 2012)	24
FIG. 1.8 INTERCAMBIADOR COMPACTO (CENGEL, 2007).....	24
FIG. 2.9 DIAGRAMA DE TUBERÍA E INSTRUMENTACIÓN DE LA CUBA TÉRMICA. FUENTE: PROPIA	35
FIG. 2.10 DIAGRAMA PARA LA CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE. FUENTE: PROPIA	40
FIG. 2.11 DIAGRAMA PARA LA CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA EXTERNA. FUENTE: PROPIA	42
FIG. 2.12 DIAGRAMA PARA LA CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE. FUENTE: PROPIA.....	44
FIG. 2.13 DIAGRAMA PARA LA CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN. FUENTE: PROPIA.....	47
FIG. 2.14 DIAGRAMA PARA EL ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA. FUENTE: PROPIA	49
FIG. 2.15 DIAGRAMA PARA EL ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR. FUENTE: PROPIA..	51
FIG. 2.16 DIAGRAMA PARA EL ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN Y VÁLVULA DE MEZCLA. FUENTE: PROPIA...	53
FIG. 2.17 DIAGRAMA PARA EL ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR. FUENTE: PROPIA.....	55
FIG. 3.18 PERFIL DE CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE. FUENTE: PROPIA	62
FIG. 3.19 PERFIL DE CALEFACCIÓN POR CIRCULACIÓN EXTERNA. FUENTE: PROPIA.....	63
FIG. 3.20 PERFIL DE CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE. FUENTE: PROPIA.....	65
FIG. 3.21 PERFIL DE CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN. FUENTE: PROPIA.....	67
FIG. 3.22 PERFIL DE ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA. FUENTE: PROPIA	69
FIG. 3.23 PERFIL DE ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR. FUENTE: PROPIA.....	72
FIG. 3.24 PERFIL DE ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN Y VÁLVULA DE MEZCLA. FUENTE: PROPIA.....	74
FIG. 3.25 PERFIL DE ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR. FUENTE: PROPIA	77
FIG. 3.26 VÁLVULA DE SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO	79
FIG. 3.27 (A) COMPRESOR, (B) VÁLVULA DE APERTURA DEL AIRE COMPRIMIDO HACIA LA PLANTA PILOTO..	80
FIG. 3.28 VÁLVULA DE CONTROL DE PRESIÓN DE ENTRADA DEL AIRE COMPRIMIDO DE LA CUBA TÉRMICA ...	80
FIG. 3.29 VÁLVULAS (A) V1, (B) V7, (C) V8 Y (D) V10	81
FIG. 3.30 TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	81
FIG. 3.31 CONEXIÓN DE LA CUBA TÉRMICA A LA ELECTRICIDAD	81
FIG. 3.32 CORTE GENERAL Y PUESTA EN TENSIÓN DEL EQUIPO	82
FIG. 3.33 BOTÓN MARCHA GENERAL.....	82
FIG. 3.34 VÁLVULAS (A) V6 Y (B) V9.....	82
FIG. 3.35 BOTONES MARCHA GENERAL Y MARCHA BOMBA ACTIVOS	83
FIG.3. 36 VÁLVULA V3.....	83
FIG. 3.37 BOTONES MARCHA GENERAL, MARCHA BOMBA Y MARCHA AGITACIÓN CUBA ACTIVOS.....	84
FIG. 3.38 AGITADOR DE LA CUBA DE VIDRIO	84
FIG. 3.39 REGULADOR 1 (A) MODO MANUAL (B) ENVIANDO CONSIGNA (ABAJO) Y RECIBIENDO MEDIDA (ARRIBA).....	85
FIG. 3.40 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA	85
FIG. 3.41 BOTONES MARCHA GENERAL, MARCHA BOMBA, MARCHA AGITACIÓN CUBA Y MARCHA CALENTADOR CUBA ACTIVOS.....	86
FIG. 3.42 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PREVIO AL ESTUDIO	87
FIG. 3.43 REGULADORES 1 Y 2 CON CONSIGNA DESEADA Y MODO RECOMENDADO.....	87
FIG. 3.44 VÁLVULA V13.....	88

FIG. 3.45 BOTONES MARCHA GENERAL, MARCHA BOMBA, MARCHA AGITACIÓN CUBA Y MARCHA CALENTADOR CUBA ACTIVOS.....	89
FIG. 3.46 VÁLVULAS (A) V2 Y (B) V7.....	89
FIG. 3.47 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PREVIO AL ESTUDIO	90
FIG. 3.48 REGULADOR 1 MOSTRANDO CONSIGNA RECOMENDADA	90
FIG. 3.49 VÁLVULA V11.....	91
FIG. 3.50 TERMÓMETRO BIMETÁLICO PORTÁTIL A LA SALIDA DE LA CAMISA DOBLE.....	91
FIG. 3.51 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PARA EL ESTUDIO.....	92
FIG. 3.52 SERVICIO DE AGUA POTABLE.....	93
FIG. 3.53 BOTONES MARCHA GENERAL Y MARCHA BOMBA ACTIVOS	93
FIG. 3.54 TAPÓN, UBICADO DEBAJO DE LOS MEDIDORES DE FLUJO	94
FIG. 3.55 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PREVIO AL ESTUDIO	94
FIG. 3.56 REGULADOR 1 MOSTRANDO CONSIGNA RECOMENDADA	95
FIG. 3.57 VÁLVULA V12.....	95
FIG. 3.58 TERMÓMETRO BIMETÁLICO PORTÁTIL A LA SALIDA DEL SERPENTÍN INTERNO	96
FIG. 3.59 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, JUSTO PARA COMENZAR EL ESTUDIO	96
FIG. 3. 60 SERVICIO DE AGUA POTABLE	97
FIG. 3.61 BOTONES MARCHA GENERAL Y MARCHA BOMBA ACTIVOS	97
FIG. 3.62 BOTONES MARCHA GENERAL, MARCHA BOMBA, MARCHA AGITACIÓN CUBA Y MARCHA CALENTADOR GRUPO ACTIVOS.....	98
FIG. 3.63 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PREVIO AL ESTUDIO	99
FIG. 3.64 VÁLVULA (A) V6 Y (B) V9.....	100
FIG. 3.65 BOTONES DE MARCHA ACTIVOS.....	100
FIG. 3.66 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PARA DAR INICIO AL ESTUDIO.....	101
FIG. 3.67 REGULADORES 1 Y 2 CON CONSIGNA DESEADA Y MODO RECOMENDADO.....	101
FIG. 3.68 VÁLVULAS (A) V4, (B) V9, (C) V11 Y (D) V14.....	102
FIG. 3.69 BOTONES MARCHA GENERAL, MARCHA BOMBA Y MARCHA AGITACIÓN CUBA ACTIVOS.....	102
FIG. 3.70 MEDIDOR DE FLUJO.....	103
FIG. 3.71 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PREVIO AL ESTUDIO	104
FIG. 3.72 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PARA DAR INICIO AL ESTUDIO.....	105
FIG. 3.73 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PREVIO AL ESTUDIO	106
FIG. 3.74 REGULADORES 1 Y 2 CON CONSIGNA DESEADA Y MODO RECOMENDADO.....	107
FIG. 3.75 BOTONES DE MARCHA ACTIVOS.....	107
FIG. 3.76 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PARA DAR INICIO AL ESTUDIO.....	108
FIG. 3.77 REGULADORES 1 Y 2 CON CONSIGNA DESEADA Y MODO RECOMENDADO.....	109
FIG. 3.78 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PREVIO AL ESTUDIO	110
FIG. 3.79 PUENTE EN TABLERO CON CABLES BANANA, PARA DAR INICIO AL ESTUDIO.....	111
FIG. 3.80 PERFIL DE CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE CON FLUIDO TÉRMICO DE SALMUERA AL 5% (PROMEDIO). FUENTE: PROPIA	116
FIG. 3.81 PERFIL Q-T DE LA CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE CON FLUIDO TÉRMICO DE SALMUERA AL 5% (PROMEDIO). FUENTE: PROPIA	121
FIG. 3.82 PERFIL DE ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR CON FLUIDO TÉRMICO DE SALMUERA AL 5% (PROMEDIO). FUENTE: PROPIA.....	123
FIG. 3.83 PERFIL Q-T DE ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR CON FLUIDO TÉRMICO DE SALMUERA AL 5% (PROMEDIO). FUENTE: PROPIA.....	128
FIG. 3.84 PERFIL DE CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN CON FLUIDO TÉRMICO DE SALMUERA AL 5% (PROMEDIO). FUENTE: PROPIA	130
FIG. 3.85 PERFIL Q-T DE CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN CON FLUIDO TÉRMICO DE SALMUERA AL 5% (PROMEDIO). FUENTE: PROPIA	134

FIG. 3.86 PERFIL DE ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR CON FLUIDO TÉRMICO DE SALMUERA AL 5% (PROMEDIO). FUENTE: PROPIA.....	136
FIG. 3.87 PERFIL Q-T DE ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR CON FLUIDO TÉRMICO DE SALMUERA AL 5% (PROMEDIO). FUENTE: PROPIA.....	141

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 IDENTIFICACIÓN DE VÁLVULAS.....	35
TABLA 2.2 IDENTIFICACIÓN DE ACCESORIOS.....	36
TABLA 2.3 DATOS DE LA BOMBA CENTRÍFUGA	36
TABLA 2.4 DATOS DE LA VÁLVULA DE MEZCLA O DE REGULACIÓN NEUMÁTICA	37
TABLA 2.5 DATOS DEL TRANSMISOR DE CAUDAL	37
TABLA 2.6 DATOS DE LOS CAUDALÍMETROS.....	37
TABLA 2.7 DATOS DEL DETECTOR DE NIVEL.....	37
TABLA 2.8 DATOS DEL TERMÓMETRO, TERMOSTATO Y PRESOSTATO	37
TABLA 2.9 DATOS DE LA CUBA AGITADA.....	38
TABLA 2.10 DATOS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	38
TABLA 2.11 DATOS DEL MOTOR DE AGITACIÓN.....	38
TABLA 2.12 DATOS DEL AGITADOR.....	38
TABLA 2.13 DATOS DEL SERPENTÍN INTERNO	39
TABLA 2.14 CONDICIONES INICIALES PARA CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE	41
TABLA 2.15 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA LA REALIZACIÓN DE LA CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE.....	41
TABLA 2.16 ARREGLO EN EL TABLERO CON CABLES BANANA PARA LA REALIZACIÓN DE LA CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE. FUENTE: PROPIA	41
TABLA 2.17 CONDICIONES INICIALES PARA CALEFACCIÓN POR CIRCULACIÓN EXTERNA	43
TABLA 2.18 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA LA REALIZACIÓN DE LA CALEFACCIÓN POR CIRCULACIÓN EXTERNA	43
TABLA 2.19 ARREGLO EN EL TABLERO CON CABLES BANANA PARA LA REALIZACIÓN DE LA CALEFACCIÓN POR CIRCULACIÓN EXTERNA. FUENTE: PROPIA.....	43
TABLA 2.20 CONDICIONES INICIALES PARA CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE	45
TABLA 2.21 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA EL ACONDICIONAMIENTO DEL FLUIDO DE CALENTAMIENTO EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	45
TABLA 2.22 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA LA REALIZACIÓN DE LA CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE	46
TABLA 2.23 ARREGLO EN EL TABLERO CON CABLES BANANA PARA LA REALIZACIÓN DE LA CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE. FUENTE: PROPIA.....	46
TABLA 2.24 CONDICIONES INICIALES PARA CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN INTERNO.....	47
TABLA 2.25 ARREGLO EN EL TABLERO CON CABLES BANANA PARA LA REALIZACIÓN DE LA CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN INTERNO. FUENTE: PROPIA.....	48
TABLA 2.26 CONDICIONES INICIALES PARA EL ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA..	49
TABLA 2.27 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA EL ACONDICIONAMIENTO DEL FLUIDO DE ENFRIAMIENTO EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	49
TABLA 2.28 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA.....	50
TABLA 2.29 ARREGLO EN EL TABLERO CON CABLES BANANA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA. FUENTE: PROPIA	51
TABLA 2.30 CONDICIONES INICIALES PARA EL ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR DE CALOR	52
TABLA 2.31 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR DE CALOR	52
TABLA 2.32 ARREGLO EN EL TABLERO CON CABLES BANANA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR DE CALOR. FUENTE: PROPIA.....	53
TABLA 2.33 CONDICIONES INICIALES PARA EL ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN Y VÁLVULA DE MEZCLA	54
TABLA 2.34 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN Y VÁLVULA DE MEZCLA.....	54

TABLA 2.35 ARREGLO EN EL TABLERO CON CABLES BANANA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN Y VÁLVULA DE MEZCLA. FUENTE: PROPIA.....	55
TABLA 2.36 CONDICIONES INICIALES PARA EL ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR DE CALOR	56
TABLA 2.37 ARREGLO DE VÁLVULAS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR DE CALOR	56
TABLA 2.38 ARREGLO EN EL TABLERO CON CABLES BANANA PARA LA REALIZACIÓN DEL ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR DE CALOR. FUENTE: PROPIA	57
TABLA 3.39 SIMBOLOGÍA DE LA CUBA TÉRMICA. FUENTE: PROPIA.....	60
TABLA 3.40 RESULTADOS DE CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA. FUENTE: PROPIA.....	61
TABLA 3.41 RESULTADOS DE CALEFACCIÓN POR CIRCULACIÓN EXTERNA. FUENTE: PROPIA.....	63
TABLA 3.42 RESULTADOS DE CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE. FUENTE: PROPIA.....	64
TABLA 3.43 RESULTADOS DE CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN. FUENTE: PROPIA	66
TABLA 3.44 RESULTADOS DE ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA. FUENTE: PROPIA	68
TABLA 3.45 RESULTADOS DE ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR DE CALOR. FUENTE: PROPIA.....	70
TABLA 3.46 RESULTADOS DE ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN Y VÁLVULA DE MEZCLA. FUENTE: PROPIA....	73
TABLA 3.47 RESULTADOS DE ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR DE CALOR. FUENTE: PROPIA.....	76
TABLA 3.48 RESULTADOS DE CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE, SALMUERA AL 5%. FUENTE: PROPIA....	114
TABLA 3.49 PROMEDIOS TIC2+TI3 PARA REVISIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO TÉRMICO (SALMUERA AL 5%). FUENTE: PROPIA.....	117
TABLA 3.50A ELECCIÓN DEL VALOR DE α . FUENTE: PROPIA	118
TABLA 3.51A PROPIEDADES DEL FLUIDO DE TRABAJO	118
TABLA 3.52A LONGITUD DE LA PALETA. FUENTE: PROPIA	119
TABLA 3.50B DATOS DE TEMPERATURA, FLUJO Y LONGITUD DE LA CAMISA DOBLE. FUENTE: PROPIA.....	118
TABLA 3.51B CÁLCULO DEL ÁREA DE FLUJO Y DIÁMETRO EQUIVALENTE. FUENTE: PROPIA	118
TABLA 3.52B GASTO MÁSIKO, PROPIEDADES DE LA SALMUERA Y NÚMEROS ADIMENSIONALES. FUENTE: PROPIA.....	118
TABLA 3.53 DATOS DE LA CAMISA DOBLE DE ÁREA DE INTERCAMBIO, CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIAL Y ESPESOR DE LA CAMISA DOBLE	120
TABLA 3.54 RESULTADOS COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR. FUENTE: PROPIA	120
TABLA 3.55 RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL CALOR TRANSFERIDO. FUENTE: PROPIA.....	120
TABLA 3.56 RESULTADOS ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR, SALMUERA AL 5%. FUENTE: PROPIA	122
TABLA 3.57 PROMEDIOS TIC3+TI3 PARA OBTENCIÓN DE PROPIEDADES DEL FLUIDO TÉRMICO. FUENTE: PROPIA.....	124
TABLA 3.58A PROPIEDADES DEL FLUIDO DE TRABAJO. FUENTE: PROPIA.....	125
TABLA 3.59A LONGITUD DE LA PALETA. FUENTE: PROPIA	126
TABLA 3.58B DATOS DE TEMPERATURA, FLUJO Y LONGITUD DE LA CAMISA DOBLE. FUENTE: PROPIA.....	125
TABLA 3.59B GASTO MÁSIKO, PROPIEDADES DE LA SALMUERA Y NÚMEROS ADIMENSIONALES. FUENTE: PROPIA.....	125
TABLA 3.60 RESULTADOS COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y CALOR TRANSFERIDO. FUENTE: PROPIA	127
TABLA 3.61 RESULTADOS CÁLCULO DEL CALOR TRANSFERIDO. FUENTE: PROPIA.....	127
TABLA 3.62 RESULTADOS CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN, SALMUERA AL 5%. FUENTE: PROPIA.....	129
TABLA 3.63A ELECCIÓN DEL VALOR DE α . FUENTE: PROPIA.....	131
TABLA 3.64A PROPIEDADES DEL FLUIDO DE TRABAJO. FUENTE: PROPIA.....	131
TABLA 3.65A LONGITUD DE LA PALETA. FUENTE: PROPIA	132

TABLA 3.63B DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL SERPENTÍN. FUENTE: PROPIA.....	131
TABLA 3.64B MEDIDAS DEL SERPENTÍN.....	131
TABLA 3.65B PROPIEDADES DE LA SALMUERA A LA TEMPERATURA PROMEDIO. FUENTE: PROPIA.....	131
TABLA 3.66 DATOS DEL SERPENTÍN	133
TABLA 3.67 RESULTADOS DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y DEL CALOR TRANSFERIDO. FUENTE: PROPIA.....	133
TABLA 3.68 RESULTADOS CÁLCULO DEL CALOR TRANSFERIDO. FUENTE: PROPIA.....	133
TABLA 3.69 RESULTADOS ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR, SALMUERA AL 5%. FUENTE: PROPIA.....	135
TABLA 3.70 PROMEDIOS TIC3+TI3 PARA OBTENCIÓN DE PROPIEDADES DEL FLUIDO TÉRMICO. FUENTE: PROPIA.....	137
TABLA 3.71A PROPIEDADES DEL FLUIDO DE TRABAJO. FUENTE: PROPIA.....	138
TABLA 3.72A LONGITUD DE LA PALETA	139
TABLA 3.71B DATOS DE TEMPERATURA Y FLUJO DEL SERPENTÍN. FUENTE: PROPIA.....	138
TABLA 3.72B PROPIEDADES DE LA SALMUERA A LA TEMPERATURA PROMEDIO. FUENTE: PROPIA.....	138
TABLA 3.73 RESULTADOS COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y CALOR TRANSFERIDO. FUENTE: PROPIA	140
TABLA 3.74 RESULTADOS CÁLCULO DEL CALOR TRANSFERIDO. FUENTE: PROPIA.....	140

MANUAL DE OPERACIÓN DE UNA CUBA TÉRMICA Y ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR DE UNA SALMUERA

RESUMEN

Uno de los pilares fundamentales de la Ingeniería Química es la transferencia de calor, y por ello es indispensable su estudio para comprender los procesos que se llevan a cabo en equipos de proceso, sobre todo en la industria química. En este contexto, la presente tesis tiene como propósito analizar el fenómeno de la transferencia de calor en la Cuba Térmica, por medio de una camisa doble de vidrio y de un serpentín de acero inoxidable, mediante el uso de pruebas con agua (waters trials) como fluido de estudio. Asimismo, con la integración del manual de operación de la Cuba Térmica, se tendrá un documento que asesore al usuario sobre su funcionamiento y el modo de operación. Por último, se propone una práctica con el objetivo de determinar si una salmuera de NaCl al 5% en peso, es funcional como fluido de calentamiento o enfriamiento, con base en su coeficiente global de transferencia de calor calculado para las diferentes configuraciones en camisa doble y serpentín sumergido.

Dentro de los procesos industriales existe una variedad de anticongelantes, cuya finalidad es reducir su punto de solidificación del líquido al cual se añade, y también aumentar el punto de ebullición. La salmuera de NaCl al 5% en peso entra en esta categoría y se usa para enfriar exclusivamente para la mayoría de los procesos, siendo utilizado como fluido de calentamiento.

Experimentalmente los coeficientes globales de transferencia de calor que se obtuvieron en la calefacción por camisa doble y el enfriamiento por camisa doble e intercambiado, la calefacción por serpentín y en el enfriamiento por serpentín e intercambiador, presentan diferencias numéricas debido a las configuraciones del sistema, al material de construcción por donde fluye el fluido térmico y al área de transferencia de calor disponible. Se determinó que la configuración mediante la cual la transferencia de calor es más alta es para la de calefacción por serpentín.

INTRODUCCIÓN

El propósito de la presente tesis, es operar la Cuba Térmica y desarrollar un Manual de Operación de la Cuba Térmica CTC/3000, que incluya todos los detalles acerca de su uso integral, abarcando los servicios necesarios, así como las configuraciones de las cuales dispone. Aunado a lo anterior, se presenta una práctica que consiste en el estudio de la transferencia de calor de una salmuera de NaCl al 5% en peso, con la finalidad de conocer su funcionalidad como fluido térmico de calentamiento o enfriamiento..

En el Capítulo 1 trata los antecedentes de las operaciones unitarias, la transferencia de calor, así como información de las partes que integran el equipo: recipiente de vidrio o cuba de vidrio, chaqueta, serpentín sumergible, resistencias, intercambiador de calor, válvulas, termómetros, indicadores de nivel y de presión, bombas, transmisor y medidor de caudal.

En el Capítulo 2 se expone la justificación del porque resulta esta tesis, así como el desarrollo de la metodología que si siguió para la realización tanto del Manual de Operación como de la práctica propuesta.

Dentro del Capítulo 3 se exponen los resultados y discusiones de las pruebas con agua, las cuales sirven para verificar la información proporcionada por el fabricante, así como el Manual de Operación y los resultados discusiones de la práctica propuesta.

CAPITULO 1.

MARCO TEÓRICO

Este capítulo aborda los antecedentes, iniciando con las operaciones unitarias y su importancia dentro de los procesos.

Posteriormente, los mecanismos de transferencia de calor -conducción, convección y radiación- se explican mediante la ecuación correspondiente a cada mecanismo, así como los equipos en los cuales puede tener lugar la transferencia de calor, como recipientes enchaquetados con o sin agitación, serpentín sumergido, resistencia eléctrica y los tipos de resistencias más comunes, e intercambiadores de calor -tubos concéntricos, coraza y tubos y compactos-.

Por último se exponen los instrumentos de medición instalados en intercambiadores de calor, con los cuales, parámetros como temperatura, flujo, nivel y presión, pueden ser medidos y controlados. Estos instrumentos son: termómetros bimetalicos, termopares, medidores de flujo, válvula de regulación neumática, recipientes (tipos: uso y forma), bombas, presostato, detector de nivel y agitador.

1.1 OPERACIONES UNITARIAS

En las industrias de procesos químicos y físicos, así como en las de procesos biológicos y de alimentos, existen muchas semejanzas en cuanto a la forma en que los materiales de entrada o de alimentación se modifican o se procesan para obtener los materiales finales de productos químicos o biológicos. Es posible considerar estos procesos químicos, físicos o biológicos, aparentemente distintos, y clasificarlos en una serie de etapas individuales y diferentes llamadas operaciones unitarias. Estas operaciones unitarias son comunes a todos los tipos de industrias de proceso. (Geankoplis, 1998).

Las operaciones unitarias son igualmente aplicables a procesos físicos y químicos. Por ejemplo, la fabricación de sal común consta de la siguiente serie de operaciones básicas: transporte de sólidos y líquidos, transmisión de calor, evaporación, cristalización, secado y tamizado. En este caso no intervienen reacciones químicas. (Mc Cabe, 2007).

Las operaciones unitarias estudian principalmente la transferencia y los cambios de energía, la transferencia y los cambios de materiales que se llevan a cabo por medios físicos, pero también por medios fisicoquímicos. (Geankoplis, 1998).

1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

La transferencia de calor es uno de los fenómenos de transporte que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de un diferencial de temperatura, y es la termodinámica la que define a esta transferencia de energía como calor. La transferencia de calor no solo explica como la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que ésta tiene lugar, bajo ciertas circunstancias, tendrá lugar esa transferencia. El hecho de que el objetivo deseado del análisis sea la rapidez de la transferencia de calor, señala la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica. La termodinámica trata sistemas en equilibrio; puede usarse para predecir la cantidad de energía requerida para llevar un sistema desde un estado de equilibrio a otro; no puede usarse, en cambio, para predecir lo rápido que será el cambio, ya que el sistema no está en equilibrio durante el proceso. La transferencia de calor completa la primera y la segunda leyes de la termodinámica, al proporcionar leyes experimentales para establecer la rapidez de la transferencia de energía. (Holman, 1998)

1.2.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Existen tres mecanismos diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son conducción, convección y radiación. A continuación, se define cada uno de éstos.

CONDUCCIÓN.

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como una pared estacionaria. (Kern, 1992)

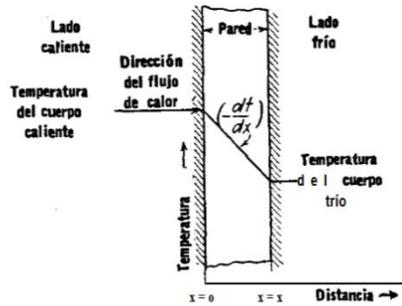


Fig. 1.1 Transferencia de calor por conducción (Kern, 1992)

La dirección del flujo de calor será a ángulos rectos a la pared, si las superficies de la pared son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico. El flujo de calor por hora es proporcional al cambio de temperatura a través de una pared y al área de la pared A . Si T es la temperatura en cualquier punto de la pared y X es el grueso de la pared en dirección del flujo de calor, la cantidad de flujo de calor dQ es dada por

$$dQ = kA \left(-\frac{dT}{dx} \right) \text{-----} (1)$$

El término $-dT/dx$ se llama gradiente de temperatura y tiene un signo negativo si se supuso una temperatura mayor en la cara de pared donde $x=0$ y menor en la cara donde $x=X$. La constante de proporcionalidad k es peculiar a la conducción de calor, por conductividad, conocida como conductividad térmica. (Kern, 1992)

CONVECCIÓN.

La transferencia de calor por convección es complicada por el hecho de que comprende movimiento del fluido, así como conducción del calor. El movimiento del fluido mejora la transferencia de calor, ya que pone en contacto porciones más calientes y más frías de ese fluido, iniciando índices más altos de conducción en un gran número de sitios. Por lo tanto, la velocidad de la transferencia de calor a través de un fluido es mucho más alta por convección que por conducción (Cengel, 2007). Este tipo de transferencia de calor puede ser descrito en una ecuación que imita la forma de la ecuación de conducción y está dada por:

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty) \text{ --- --- --- --- --- (2)}$$

Dónde:

h = coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2\text{°C}$

A_s = área superficial de transferencia de calor, m^2

T_s = temperatura de la superficie, °C

T_∞ = temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie, °C

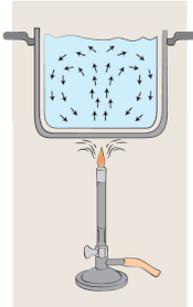


Fig. 1.2 Transferencia de calor por convección (Domínguez, 2014)

RADIACIÓN.

La transferencia de calor por radiación es diferente de la de convección y conducción debido a que el potencial impulsor no es la temperatura, sino la temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia. Además, el calor se puede transportar por radiación sin que intervenga un medio (Kreith, 2011). Con base a la segunda ley de la termodinámica, Boltzmann estableció que la velocidad de transferencia de calor se puede determinar por la siguiente fórmula:

$$dQ = \sigma\epsilon dA T^4 \text{ --- --- --- --- --- (3)}$$

Esta expresión se conoce como la ley de la cuarta potencia, donde T es temperatura absoluta, σ es una constante dimensional, pero ϵ es un factor peculiar a la radiación y se llama *emisividad*. La emisividad, igual que la conductividad térmica k o el coeficiente de transferencia de calor h , debe determinarse experimentalmente. (Kern, 1992)

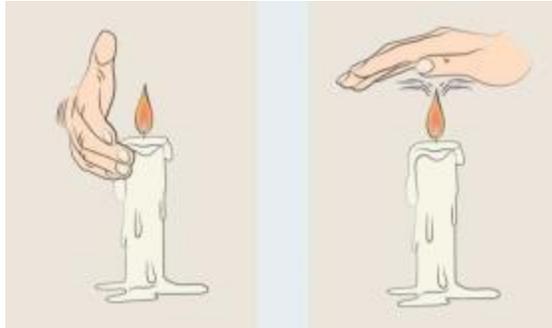


Fig. 1.3 Transferencia de calor por radiación (Domínguez, 2014)

1.2.2 RECIPIENTES ENCHAQUETADOS

a) RECIPIENTES SIN AGITACIÓN

En la literatura se dispone de pocos datos para predecir los coeficientes dentro de una chaqueta o entre la chaqueta y un líquido contenido en un recipiente cilíndrico vertical en el que no se cuenta con agitación mecánica. Durante el calentamiento el fenómeno de mezcla depende de la convección libre. Los coeficientes para calentamiento en convección libre pueden aproximarse para recipientes de gran diámetro (2 metros hacia adelante) mediante las ecuaciones (Kern, 1992):

Para tubos verticales.

$$h_e = 0.4 \left(\frac{\Delta T}{d_0} \right)^{0.25} \text{-----(4)}$$

Para tubos horizontales.

$$h_e = 0.5 \left(\frac{\Delta T}{d_0} \right)^{0.25} \text{-----(5)}$$

Dónde:

ΔT =Diferencia de temperatura entre la superficie caliente y el fluido frío, en °C

d_0 = Diámetro exterior, en metros

b) RECIPIENTES CON AGITACIÓN MECÁNICA

Los líquidos se agitan con más frecuencia en recipientes, generalmente de forma cilíndrica y provista de un eje vertical. La parte superior del recipiente puede estar

abierta al aire o cerrada y sus proporciones varían bastante dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. Generalmente lleva incorporados también accesorios tales como tubuladuras de entrada y salida, serpentines, encamisados y vainas para termómetros u otros instrumentos de medida de la temperatura (McCabe, 1991). Se muestra un ejemplo en la Figura 1.4



Fig.1.4 Recipiente enchaquetado (The Chemical Batch Reactor, Springer, 2011)

c) SERPENTÍN SUMERGIDO

Se denomina serpentín a un tubo de forma frecuentemente espiral, utilizado comúnmente para enfriar vapores provenientes de la destilación en un calderín y así condensarlos en forma líquida. Suele ser de vidrio, cobre u otro material que conduzca el calor fácilmente y es uno de los métodos más simples y económicos de proporcionar área de contacto. (QuimiNet.com, 2012)

Se suele usar para tanques y puede operar por convección natural o forzada. (Kern, 1992)



Fig. 1.5 Recipiente con serpentín sumergido (The Chemical Batch Reactor, Springer, 2011)

d) CALENTAMIENTO CON RESISTENCIA ELÉCTRICA.

Hay innumerables aplicaciones en las que el calentamiento por resistencia eléctrica puede facilitar la transferencia de calor en un fluido, particularmente en

operaciones por lotes. Hay otras ventajas que pueden derivarse del tamaño compacto de los tipos estándar de elementos eléctricos calefactores: la facilidad con la que generan altas temperaturas, eliminación de riesgos de combustión, y su fácil aplicación y adaptación para control y regulación automática. (Kern, 1992)

Los elementos calefactores por resistencia más comunes son de tres tipos:

- Calentador por inmersión: Se usa para introducción directa en líquidos y se fabrican con cubierta de cobre para calentamiento de agua y de acero para aceite y otros derivados orgánicos.
- Calentador de tira: Se usa más para calentamiento de sólidos por combustión, y puede también usarse para calentamiento de aire y gases.
- Calentador de tira aleteado: Es el más indicado para calentamiento y gases, ya que combina el calentamiento eléctrico y la superficie extendida. (Kern, 1992)

1.2.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR

El equipo de transferencia de calor se define por las funciones que desempeña en un proceso. Los intercambiadores son equipos que recuperan calor entre dos corrientes, una fría y una caliente, sin que estén en contacto directo. El vapor y el agua de enfriamiento son servicios y no se consideran en el mismo sentido que las corrientes de proceso recuperables.

Los equipos de transferencia de calor son utilizados en una gran variedad de procesos, en consecuencia, la forma en la cual se clasifican no es sencilla. A continuación, se presenta un breve listado de diferentes tipos de intercambiadores de calor, según su tipo de construcción (Diseño de equipos de transferencia de calor, 2001):

- Intercambiadores de doble tubo
- Intercambiadores de tipo evaporativo
- Intercambiadores de placa

- Intercambiadores de serpentín
- Intercambiadores de espiral
- Intercambiadores enfriados por aire
- Intercambiadores de coraza y tubos
- Intercambiadores de rotatorios

Los intercambiadores de calor pueden tener diferente tipo de flujo:

Si en el intercambiador de calor, los líquidos caliente y frío circulan en una misma dirección, este circuito de movimiento se llama *corriente en paralelo*.

Si los líquidos circulan en direcciones opuestas, se denomina *contracorriente*.

Finalmente, si los líquidos circulan de modo que se cruzan entre sí, se llama *corriente cruzada*. (Mijeev, 1979)

A continuación, se presentan los tipos de intercambiadores: de doble tubo, de coraza con tubos y compactos. Esto es debido a que el equipo contiene un intercambiador pequeño que es de gran utilidad en los estudios de transferencia de calor realizados en la parte de enfriamiento, el cual es del tipo de coraza y tubos.

a) INTERCAMBIADORES DE DOBLE TUBO.

El intercambiador más simple es el intercambiador de doble tubo o de tubos concéntricos. Uno de los fluidos fluye en el interior de una tubería y el otro lo hace en el espacio anular entre ambas tuberías. Los fluidos pueden circular en paralelo o a contracorriente. El intercambiador puede fabricarse con un simple par de tubos adaptando las conexiones en los extremos, o con varios pares interconectados en serie. Este tipo de intercambiador es útil principalmente para velocidades de flujo bajas. (Geankoplis, 1998).

b) INTERCAMBIADORES DE TUBOS Y CORAZA

La satisfacción de muchas demandas industriales requiere el uso de un gran número de horquillas de doble tubo. Estas consumen considerable área

superficial, así como presentan un número considerable de puntos en los cuales puede haber fugas. Cuando se requieren superficies grandes de transferencia de calor, pueden ser mejor obtenidas por medio de equipo de tubos y coraza.

El equipo de tubo y coraza involucra la expansión de un tubo en un espejo y la formación de un sello que no fuga bajo condiciones razonables de operación.

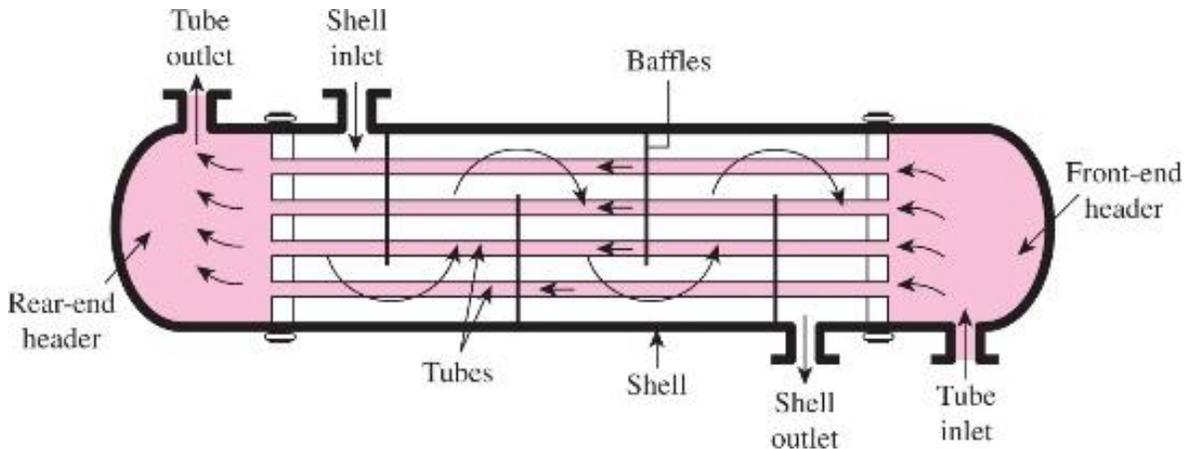


Fig. 1.6 Intercambiador de coraza y tubos (Cengel, 2007)

Los tubos para intercambiador de calor también se conocen como tubos para condensador y no deberán confundirse con tubos de acero u otro tipo de tubería obtenida por extrusión a tamaños normales de tubería de hierro. (Kern, 1992)

Espaciado de los tubos. Los orificios de los tubos no pueden taladrarse muy cerca uno de otro, ya que una franja demasiado estrecha de metal entre los tubos adyacentes, debilita estructuralmente el cabezal de tubos o espejos. La distancia más corta entre dos orificios adyacentes es el *claro* o *ligadura*, y éstos son casi estándar. Los tubos se colocan en arreglos ya sea triangular o cuadrado. La ventaja del espaciado cuadrado es que los tubos son accesibles para limpieza externa y tienen pequeña caída de presión cuando el fluido fluye en la dirección indicada. El espaciado de los tubos P_t es la distancia menor de centro a centro en tubos adyacentes. (Kern, 1992)

Se usan deflectores transversales de tal manera que el fluido se ve forzado a fluir perpendicularmente por la batería de tubos en lugar de hacerlo en paralelo. Esta

turbulencia adicional generada por el flujo transversal, aumenta el coeficiente de transferencia de calor de la coraza. (Geankoplis, 1998)

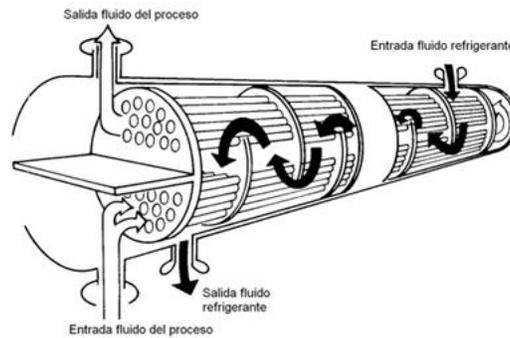


Fig. 1.7 Deflectores (Jaramillo, 2012)

c) INTERCAMBIADORES COMPACTOS.

Los intercambiadores compactos alcanzan un área superficial por unidad de volumen muy grande, en comparación con los intercambiadores de coraza y tubo y los de tubos concéntricos. Estos intercambiadores se adaptan mejor a las aplicaciones en las que se tienen corrientes gaseosas y valores bajos del coeficiente convectivo h (Holman, 1998).

Permiten lograr razones elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un volumen pequeño y son de uso común en aplicaciones con limitaciones estrictas con respecto al peso y el volumen de esos aparatos (Cengel, 2007).

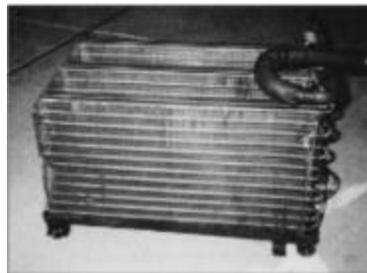


Fig. 1.8 Intercambiador compacto (Cengel, 2007)

1.2.4 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN EN INTERCAMBIADORES DE CALOR

TERMÓMETROS BIMETÁLICOS

El termómetro bimetálico es un instrumento utilizado para medir temperatura mediante la contracción y expansión de dos distintas aleaciones metálicas de alto y bajo coeficiente de dilatación. Éstos están constituidos por un tubo en cuyo interior está colocada una espiral helicoidal bimetálica. Dicha espiral está soldada por un extremo a la parte inferior del tubo y por otra a una varilla de transmisión, a su vez conectada a una aguja indicadora. (QuimiNet.com, 2003)

TERMOPARES

Un termopar es un a sensor para medir temperatura. Consiste en dos metales diferentes unidos por un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría se produce un voltaje que se puede correlacionar con la temperatura. Las aleaciones de termopar están disponibles por lo normal en forma de alambre. (OMEGA Engineering, 2003-2018).

Los termopares de la cuba térmica son de acero inoxidable 316, en forma de barra y se encuentran colocados en la doble capa de vidrio, a la salida del intercambiador y a la salida de la válvula de mezcla. (PIGNAT, 2002)

MEDIDORES DE FLUJO

Un flujometro es un instrumento que se usa para medir el caudal lineal, no lineal, de masa o volumétrico de un líquido o gas. (OMEGA Engineering, 2003-2018)

Los medidores de flujo que tiene la cuba térmica son tipo plástico, transparente y con una graduación que va de 0 a 1000 l/h y de 0 a 40 l/h, respectivamente y ambos tienen un medidor de nivel metálico. (PIGNAT, 2002)

TRANSMISOR DE CAUDAL

Los transmisores son instrumentos que convierten la salida del sensor en una señal suficientemente fuerte como para transmitirla al controlador o a otro aparato receptor. (ZONA DIODO, 2008)

Las señales de salida del transmisor pueden ser neumáticas, eléctricas o digitales. (ZONA DIODO, 2008)

El transmisor que se encuentra instalado en la Cuba Térmica es de caudal, con una gama de 30 a 720 L/h, tolerando una temperatura de hasta 80°C y una presión de hasta 16 bares. (PIGNAT, 2002).

VÁLVULA DE REGULACIÓN NEUMÁTICA

Las válvulas reguladoras permiten variar la productividad de las bombas al manipular la presión desde el mínimo hasta el máximo nivel. Al mismo tiempo, las válvulas reguladoras actúan como mecanismo de seguridad, ya que no permiten que se exceda el nivel de presión que elige la persona que las está operando, con lo que se reduce el riesgo de accidentes. (QuimiNet.com, 2003)

RECIPIENTES

Existen numerosos tipos de recipientes que se utilizan en las plantas industriales o de procesos. Algunos de estos tienen la finalidad de almacenar sustancias que se dirigen o convergen de algún proceso, este tipo de recipientes son llamados en general tanques. (Osorio Díaz, 2008).

Los diferentes tipos de recipientes que existen, se clasifican de la siguiente manera:

POR SU USO:

Se dividen en recipientes de almacenamiento y en recipientes de procesos.

Los primeros sirven únicamente para almacenar fluidos a presión y de acuerdo con sus servicios son conocidos como tanques de almacenamiento, tanques de día, tanques acumuladores, etc. (Osorio Díaz, 2008)

POR SU FORMA:

Los recipientes a presión pueden ser cilíndricos o esféricos. Los primeros son horizontales o verticales, y pueden tener en algunos casos, chaquetas para incrementar o decrecer la temperatura de los fluidos según sea el caso. (Osorio Díaz, 2008)

Los esféricos se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento, y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes a altas presiones. (Osorio Díaz, 2008)

Los equipos encamisados se utilizan en muchas industrias de procesamiento (por ejemplo, la industria alimentaria, química y farmacéutica) para el tratamiento térmico de materias primas. Esto da lugar a diferentes requisitos para el tamaño, equipamiento, construcción y materiales en los que se realizan calderas encamisadas. (PACOVSKÉ STROJÍRNY, 2013).

Son altamente usados en la industria de la biotecnología, debido a que son la base para la construcción de los biorreactores. (Diseño y construcción de un tanque agitado, 2016)

El recipiente enchaquetado que tiene la cuba térmica consta de un resistencia eléctrica sumergible, un termopar que indica la temperatura al a cual se encuentra el fluido en el interior, un detector de nivel, la chaqueta de vidrio, el serpentín sumergible de acero inoxidable así como su agitador con el motor correspondiente. (PIGNAT, 2002)

BOMBAS

Las bombas son máquinas en las cuales se produce una transformación de la energía mecánica en energía hidráulica (velocidad y presión) comunicada al fluido que circula por ellas. (FNMT, 2017)

Atendiendo al principio de funcionamiento, pueden clasificarse en los siguientes grupos:

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétrico:
En ellas se cede energía de presión al fluido mediante volúmenes confinados. Pueden a su vez subdividirse en alternativas y rotativas. (FNMT, 2017)
- Turbobombas:

Es una máquina hidráulica que cede energía al fluido mediante la variación del momento cinético producido en el impulsor o rodete. (FNMT, 2017) Atendiendo a la dirección del flujo a la salida del rodete, pueden clasificarse en:

- Centrífugas: el flujo a la salida del rodete tiene dirección perpendicular al eje (flujo radial).
- Axiales: dirección del flujo a la salida es paralela al eje (flujo axial).
- Helicocentrífugas: el flujo es intermedio entre radial y axial (flujo mixto). (FNMT, 2017)

La bomba centrífuga del equipo es de marca CALPEDA con un caudal de 2.3 m³/h y temperatura máxima del líquido en 60°C. (PIGNAT, 2002).

PRESOSTATO

Un presostato es un dispositivo que se utiliza para cerrar o abrir un circuito eléctrico en función de la presión que ejerce un fluido sobre un pistón interno que se mueve hasta que se unen dos contactos. Es un interruptor de presión que actúa dependiendo de la presión del agua. Cuando baja la presión activa el funcionamiento de la bomba. La sensibilidad de activación del presostato se puede regular mediante un tornillo. (Autosolar, 2017)

El presostato que contiene la Cuba Térmica está construido de acero inoxidable 316 y está establecido en un rango de -1 a 5 bares. (PIGNAT, 2002)

DETECTOR DE NIVEL

La función de un detector de nivel, también llamado detector de umbral, es monitorear una variable física que pueda ser expresada en términos de un voltaje, y enviar una señal cada vez que la variable sobrepase o caiga por debajo de un valor preestablecido llamado el valor de referencia. (Electrónica Analógica Michelle German, 2011)

El detector de nivel, ubicado en la cuba de vidrio, está construido de acero inoxidable 316. (PIGNAT, 2002).

AGITADOR Y MOTOR DE AGITACIÓN

Generalmente el equipo consiste en un recipiente cilíndrico (cerrado o abierto), y un agitador mecánico, montado en un eje y accionado por un motor eléctrico. Las proporciones del tanque varían ampliamente, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. (Agitación y mezclado, 2012).

Los agitadores se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del agitador, llamados axiales, y los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial. (McCabe, 1991)

El agitador que contiene la cuba de vidrio es del tipo de Hélice 3 palas, y el motor de agitación es tipo Eurostar digital con un rango de velocidad entre 50 y 2000 rpm. (PIGNAT, 2002)

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible que, a través de la evaluación del desempeño de una solución de salmuera como líquido de enfriamiento o calentamiento, se pueda describir de manera ilustrativa el funcionamiento de la Cuba Térmica que se encuentra en la Planta Piloto de Ingeniería Química?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Poner en marcha la Cuba Térmica que se encuentra en la Planta Piloto de Ingeniería Química mediante la elaboración de un Manual de Operación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reproducir, bajo las mismas condiciones, los experimentos de calentamiento y enfriamiento propuestos en la documentación entregada por el fabricante, para verificar el buen funcionamiento de la Cuba Térmica.
- Realizar repeticiones de las pruebas de calentamiento y enfriamiento para garantizar la repetibilidad y reproducibilidad de los resultados.
- Determinar y delimitar el fluido térmico a utilizar para llevar a cabo la transferencia de calor en una Cuba Térmica, sin dejar de lado la compatibilidad del fluido con los materiales de construcción del equipo.
- Comprender el funcionamiento del intercambiador de agua fría para evaluar si la solución de salmuera funciona mejor como fluido de calentamiento o como fluido de enfriamiento.
- Elaborar un manual de operación de la Cuba Térmica que describa a detalle sus capacidades y proponer una práctica para que se integre al Manual de Practicas de la Unidad de Aprendizaje del Laboratorio de Operaciones Unitarias I, Plan reestructurado 2015

CAPÍTULO 2.

METODOLOGÍA

En este capítulo se expone la justificación de la importancia y el propósito del desarrollo de esta tesis en función del contexto académico e industrial para la formación del ingeniero químico.

Enseguida se muestra el desarrollo que se siguió para la realización de las pruebas expuestas en el siguiente capítulo, incluyendo el Diagrama e Tubería e Instrumentación y la descripción detallada de cómo se llevó a cabo cada experimentación, englobando un diagrama específico para cada uno, las condiciones iniciales, el arreglo de válvulas para el acondicionamiento -en los casos en los cuales debe realizarse-, el arreglo de válvulas para la ejecución de la experimentación y la configuración del tablero de control.

2.1 JUSTIFICACIÓN

Una de las principales funciones del ingeniero químico es, realizar un control de los procesos eficiente, y para esto requiere conocer los fenómenos de transporte que se llevan a cabo, así como las reacciones químicas, por ejemplo; además, de conocer los principios del funcionamiento de los equipos de procesos y los auxiliares. En este contexto, cuerpos como una cuba térmica son importantes porque, desde el marco académico, es un equipo que abarca la transferencia de calor en estado transitorio, además de ser una breve introducción al entendimiento de cómo funciona básicamente un reactor enchaquetado con serpentín sumergido. Y desde el marco industrial, es útil, para como profesionalista, visualizar tanto las ventajas como desventajas de cada medio de calefacción o enfriamiento, acorde al proceso que se desee llevar a cabo y las sustancias que estén implicadas.

Por ello, es fundamental que los estudiantes del programa de Ingeniería Química desarrollen las habilidades en el uso de equipos a escala como una cuba térmica; en particular en el Laboratorio de Ingeniería Química se adquirió un equipo de Conducción Térmica de una Cuba Agitada CTC/3000, sin embargo el proveedor entregó un manual de operación general aludiendo que dicho documento correspondía al principio de operación de equipos similares, por lo que no se pudo tomar como el manual de operación dirigido a los alumnos y como referente para el desarrollo de las prácticas. En este sentido, el propósito de este proyecto fue

operar la Cuba Térmica, integrar un manual de operación dirigido a los alumnos y proponer una práctica de laboratorio para el Laboratorio de Operaciones Unitarias II.

2.2 DESARROLLO

A continuación, se describen en orden cronológico las acciones llevadas a cabo para la integración del manual de operación de la Cuba Térmica, y al finalizar se presentan los resultados de las pruebas de arranque del equipo.

1. Lectura y análisis de la documentación entregada por el fabricante sobre la Cuba Térmica, la cual consta de un manual de operación general, el manual del intercambiador de calor, el manual de la válvula de mezcla o de regulación neumática, información de uso acerca de los medidores de flujo, del transmisor de caudal, del serpentín, de la cuba de vidrio y de la chaqueta de vidrio.
2. Identificación física de las partes que conforman la Cuba Térmica, mediante el diagrama contenido en el manual del fabricante, ubicación de las partes móviles -en este caso, termómetros bimetálicos, así como la dirección del flujo-.
3. Elaboración del diagrama de tuberías e instrumentación de la Cuba Térmica, a partir de los datos e información recabada en la revisión y comparación del manual contra el equipo principal y sus equipos auxiliares. Después de la integración del diagrama, este se validó comparándolo contra el equipo, sin encontrar diferencias. El diagrama se muestra a continuación:

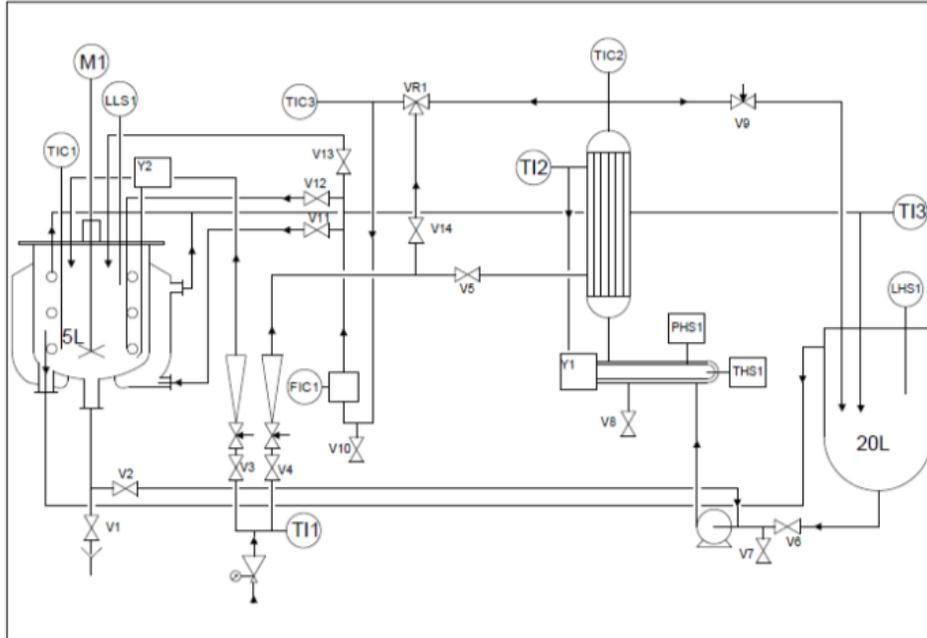


Fig. 2.9 Diagrama de tubería e instrumentación de la Cuba térmica. Fuente: Propia

IDENTIFICACIÓN DE TODOS LOS ELEMENTOS EN LA CUBA TÉRMICA

En la Tabla 3.1 se describen las válvulas contenidas en la Figura 3.9.

Tabla 2.1 Identificación de válvulas

V1	Válvula de vaciado cuba de vidrio
V2	Válvula para puesta en recirculación
V3	Válvula para admisión directa de agua fría a la cuba de vidrio
V4	Válvula para admisión directa al módulo grupo caliente/frío
V5	Válvula de admisión de agua fría en el intercambiador
V6	Válvula de alimentación a la bomba centrífuga
V7	Válvula de vaciado del tanque de almacenamiento
V8	Válvula de vaciado de la resistencia externa
V9	Válvula del reglaje de retorno a tanque de almacenamiento
V10	Válvula de vaciado del transmisor de caudal y camisa doble
V11	Válvula de selección para circulación en camisa doble
V12	Válvula de selección para circulación en serpentín
V13	Válvula de admisión directa a la cuba de vidrio
V14	Válvula de alimentación en agua fría de la válvula de mezcla

En la Tabla 3.2 se observa la descripción de los accesorios restantes, divididos en tres secciones: conjunto cuba de vidrio, circulación del fluido térmico y circulación de agua fría.

Tabla 2.2 Identificación de accesorios

CONJUNTO CUBA DE VIDRIO	
Y2	Resistencia eléctrica sumergible
M1	Motor de agitación con móvil tipo hélice a tres palas
LLS1	Detector de nivel de la cuba de vidrio
TIC1	Sensor de temperatura dentro de la cuba agitada
TI3	Termómetro bimetálico a la salida de la camisa doble/serpentín
CIRCULACIÓN DEL FLUIDO TÉRMICO	
Y1	Resistencia eléctrica externa
PHS1	Presostato de inox
THS1	Indicador de temperatura
LHS1	Detector de nivel del tanque de almacenamiento
FIC1	Transmisor de caudal
TIC2	Sensor de temperatura a la salida del intercambiador
TIC3	Sensor de temperatura a la entrada de la camisa doble/serpentín
CIRCULACIÓN DE AGUA FRÍA	
TI1	Termómetro bimetálico a la entrada del circuito de agua fría
TI2	Termómetro bimetálico a la salida del intercambiador

Tabla 2.3 Datos de la bomba centrífuga

Bomba centrífuga CALPEDA				
Tipo	BCT 61			
Bomba	Caudal	2.3 m ³ /h		
	Temperatura máxima del líquido	60°C		
	Materiales	Cuerpo	Bronce	
		Árbol	Acero AISI 430	
		Rueda	Latón	
Guarnición mecánica		Carbono duro-cerámico		
Motor	Tensión	220 v, trifase, 60Hz		
	Potencia	0.33kW		
	Velocidad	2900 rpm		

Tabla 2.4 Datos de la válvula de mezcla o de regulación neumática

Válvula de regulación neumática SAUTER		
Válvula 3 vías	B6 R 15 F33φ	
Materiales	Cuerpo	Bronce
	Asiento	Bronce
	Obturador	Inox
	Prensa estopa	Latón
PN	16 (hasta 120°C)	
KVS	1 m ³ /h	
Servomotor neumático	AV42 Fφφ1	
	Carrera	14 mm
	Presión de mando	0.2 a 1 bar

Tabla 2.5 Datos del transmisor de caudal

Transmisor de caudal KOBOLD		
Tipo	DF-MA	
Gama de caudal	30-720 l/h	
Presión de medida	±25% de la escala completa	
Temperatura máxima de servicio	80°C	
Presión máxima de servicio	16 bar	
Materiales	Cuerpo	Latón niquelado
	Aletas	PDM (polioximetileno)
	Eje	Inox
	Juntas	Perbunan

Tabla 2.6 Datos de los caudalímetros

Caudalímetro a flotador y a flotador perturbación		
Materiales	Cuerpo	Trogamid-T
	Flotador	Polipropileno
	Juntas	EPDM
	Conexión	PVC

Tabla 2.7 Datos del detector de nivel

Detector de nivel		
Materiales	Tubo guía	Inox 316
	Flotador	Inox 316 TI
Densidad mínima	>0.8	

Tabla 2.8 Datos del termómetro, termostato y presostato

Componente	Material	Rango de operación
Termómetro	Tubo inox	-10 a 110°C
Termostato	Inox	0 a 150°C
Presostato	Inox 316 L	-1 a 5 bar

Tabla 2.9 Datos de la cuba agitada

Cuba agitada	
Cuba	
Diámetro interno	200 mm
Altura	270 mm
Volumen útil	5 L
Materiales	Vidrio, espesor de 5 mm
Doble envoltura	
Diámetro externo	240 mm
Altura	200 mm
Material	Vidrio, espesor de 5 mm

Tabla 2.10 Datos del intercambiador de calor

Intercambiador térmico PICKER		
Tipo	CD395F5ΦAA	
Superficie de intercambio	0.18 m ²	
Presión de servicio máxima	Coraza	10 bar
	Tubos	6 bar
Materiales	Cuerpo	Soldado en bronce y cobre
	Haz	Cobre, espesor de 0.35 mm
	Juntas tóricas	Nitrilo (100°C máx)
	Tapas	Matizadas en fundición
Diámetro interno de la coraza	86 mm	
Haz	48 tubos diámetro externo	8 mm
	1 tubo central diámetro externo	18 mm
	Longitud	157 mm
Deflectores	Espesor simple a paso cerrado	

Tabla 2.11 Datos del motor de agitación

Motor de Agitación IKA	
Tipo	Eurostar digital
Tensión	230 v, monofase, 50/60 Hz
Potencia	75 W
Velocidad	50 a 2000 rpm

Tabla 2.12 Datos del agitador

Agitador	
Hélice tres palas diámetro	90 mm
Diámetro y longitud del árbol	10 mm y 6 cm

Tabla 2.13 Datos del serpentín interno

Serpentín interno	
Altura	275 mm
Número de espiras	4.5
Diámetro espira	126.3 mm
Espacio entre espiras	20 mm
Material	Inox 304 L, diámetro 10x12
Superficie	0.06 m ²

4. Se identifican las variables de control y de respuesta de la siguiente manera:
- Variables de control de la cuba térmica: temperatura inicial del fluido de trabajo (interior de la cuba), la temperatura inicial del fluido térmico, temperatura de entrada del agua potable, velocidad de agitación, velocidad de flujo de los fluidos, y mezcla del fluido de enfriamiento con agua potable.
 - Variables de respuesta: temperaturas del fluido de trabajo en la cuba (TIC1), la temperatura del fluido de enfriamiento a la salida del intercambiador (TIC2), la temperatura a la entrada de la camisa doble o serpentín (TIC3), la temperatura de salida del fluido de enfriamiento del intercambiador de calor (TI2) y la temperatura de salida de la camisa doble o serpentín (TI3).
5. Se iniciaron las pruebas de arranque de la Cuba Térmica, utilizando pruebas con agua ("water trials"), para replicar las condiciones de operación de los estudios contenidos en el manual pedagógico del fabricante, y con ello probar la correcta calibración del equipo, así como de la parte electrónica. Se realizaron 4 pruebas de calentamiento (chaqueta de vidrio, serpentín, resistencia sumergible y calefacción por circulación externa) y 4 de enfriamiento (chaqueta de vidrio con válvula de mezcla y con intercambiador y serpentín con válvula de mezcla y con intercambiador). A continuación, se describe de manera detallada cada estudio:
- a. Calefacción por resistencia eléctrica sumergible: Este estudio consiste en llenar la cuba de vidrio, comenzar con la agitación y posteriormente enviar la señal de activación de la resistencia

eléctrica que se encuentra dentro de la misma, así como recibir la señal de la temperatura, que se podrá observar en los reguladores R1 y R2, mediante el puenteo adecuado con los cables banana. La experimentación se llevó a cabo comenzado desde 17°C y alcanzando el valor promedio de 58.9°C. La temperatura de inicio, anteriormente mencionada, se estableció en base a la información del fabricante y la final se determinó debido a que el tanque de vidrio de la cuba térmica no debe ser sometido a una temperatura de más de 60°C.

En la siguiente figura es posible observar las válvulas y accesorios que se usan en esta experimentación.

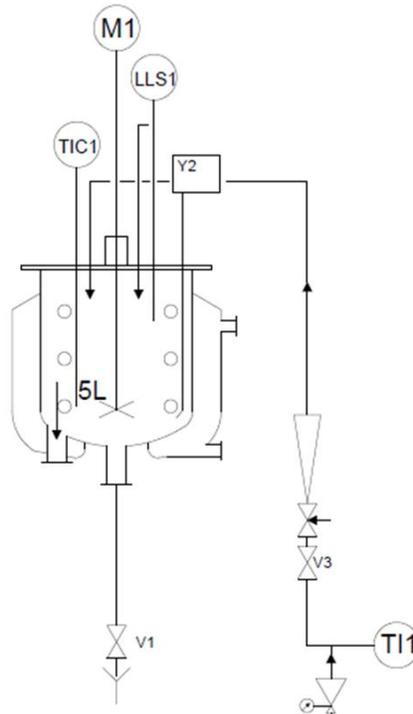


Fig. 2.10 Diagrama para la calefacción por resistencia eléctrica sumergible. Fuente: Propia

En la Tabla 2.14 se muestra las condiciones iniciales de la experimentación y en la Tabla 2.15, se observa el arreglo de válvulas empleado.

Tabla 2.14 Condiciones iniciales para calefacción por resistencia eléctrica sumergible

Número de RPM	248-251
Temperatura del agua potable (°C)	14.5
Volumen de la cuba de vidrio (L)	5
Porcentaje de flujo (FIC1)	---

Tabla 2.15 Arreglo de válvulas para la realización de la calefacción por resistencia eléctrica sumergible

Posicionamiento de válvulas
0: Cerrada 1: Abierta RM: Reglaje Manual

	ANTES	DURANTE	DESPUES
V1	0	0	0
V2	0	0	0
V3	1	0	0
V4	0	0	0
V5	0	0	0
V6	0	0	0
V7	0	0	0
V8	0	0	0
V9	0	0	0
V10	0	0	0
V11	0	0	0
V12	0	0	0
V13	0	0	0
V14	0	0	0

El puenteo correspondiente en el tablero, se muestran a continuación:

Tabla 2.16 Arreglo en el tablero con cables banana para la realización de la calefacción por resistencia eléctrica sumergible. Fuente: Propia

SEÑAL	R1	R2	VR1
Medida	TIC1		
Salida	Y2		
Modo	Man	Man	
Consigna	100%		
Gene 20mA			

- b. Calefacción por circulación externa: Esta calefacción se realiza haciendo circular al fluido, que está contenido en la cuba de vidrio, a través de una resistencia eléctrica externa que pertenece al grupo, el fluido retorna a la cuba y su temperatura se puede observar en los reguladores R1 y R2. La experimentación se llevó a cabo comenzado desde 16.6°C y alcanzando el valor promedio de 50.2°C. Cabe resaltar que el fluido se encuentra en agitación al interior de la cuba, con una velocidad promedio establecida de 250 rpm. El agitador instalado tiene la capacidad de agitar desde 50 rpm hasta 1000 rpm, sin embargo, la velocidad es un parámetro fijo establecido por la información del fabricante y por ello no representa una variable. A continuación, la Figura 2.11 se presentan los accesorios y las válvulas, así como las corrientes de proceso implicadas en esta experimentación.

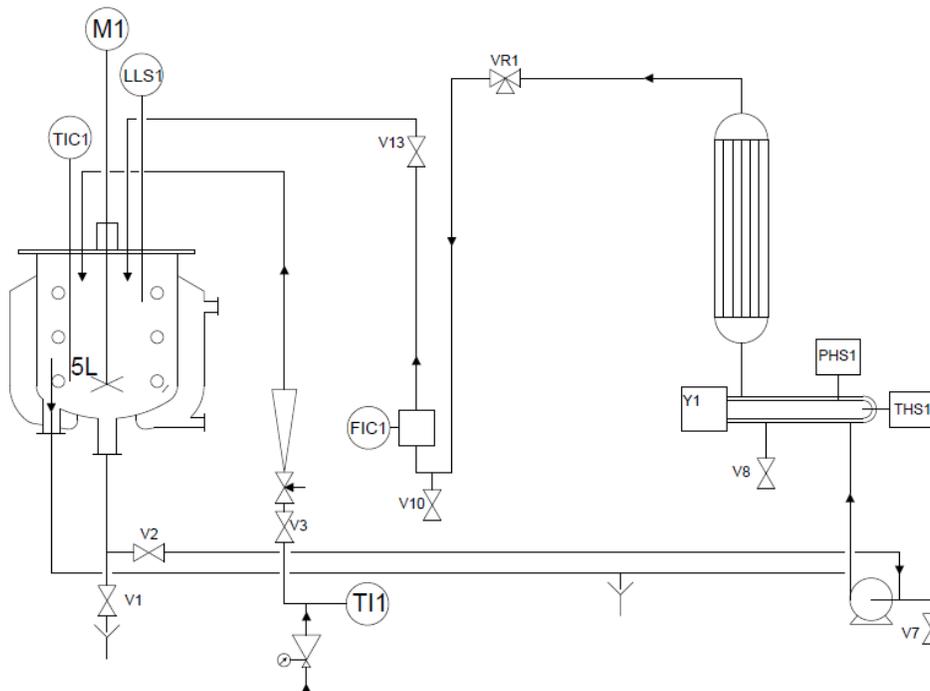


Fig. 2.11 Diagrama para la calefacción por resistencia eléctrica externa. Fuente: Propia

En la Tabla 2.17 se muestra las condiciones iniciales de la experimentación y en la Tabla 2.18, se observa el arreglo de válvulas empleado.

Tabla 2.17 Condiciones iniciales para calefacción por circulación externa

Número de RPM	248-251
Temperatura del agua potable (°C)	16.0
Volumen de la cuba de vidrio (L)	0
Porcentaje de flujo (FIC1)	50-55

Tabla 2.18 Arreglo de válvulas para la realización de la calefacción por circulación externa

Posicionamiento de válvulas

0: Cerrada 1: Abierta RM: Reglaje Manual

	ANTES	DURANTE	DESPUES
V1	0	0	0
V2	0	RM	RM
V3	1	0	0
V4	0	0	0
V5	0	0	0
V6	0	0	0
V7	0	0	0
V8	0	0	0
V9	0	0	0
V10	0	0	0
V11	0	0	0
V12	0	0	0
V13	1	1	1
V14	0	0	0

El puenteo correspondiente en el tablero, se muestran a continuación:

Tabla 2.19 Arreglo en el tablero con cables banana para la realización de la calefacción por circulación externa. Fuente: Propia

SEÑAL	R1	R2	VR1
Medida	TIC1	FIC1	
Salida	Y1		
Modo	Man	Man	
Consigna	100%		
Gene 20mA			✓

- c. Calefacción por camisa doble: En esta prueba se comienza calentando el fluido contenido en el tanque de almacenamiento hasta la consigna establecida de 47°C, para evitar un enfriamiento de más de 45°C (consigna del fabricante), por medio de la resistencia eléctrica externa del grupo. Después se llena completamente la cuba de vidrio y se realiza el arreglo en el tablero y en las válvulas, de modo que la válvula de regulación neumática esté 100% en apertura y el fluido de calentamiento cruce la camisa doble, calentando el fluido en agitación, la cual se realiza también a velocidad de 250 rpm. La experimentación se llevó a cabo comenzado desde 20.5°C y alcanzando el valor promedio de 32.5°C. La salida de la camisa doble es medida por un termómetro bimetálico portátil, siendo reportada una temperatura de 44.5°C en promedio. Por consiguiente, se muestra el diagrama donde es posible visualizar los accesorios, las válvulas y corrientes de procesos implicadas en esta calefacción.

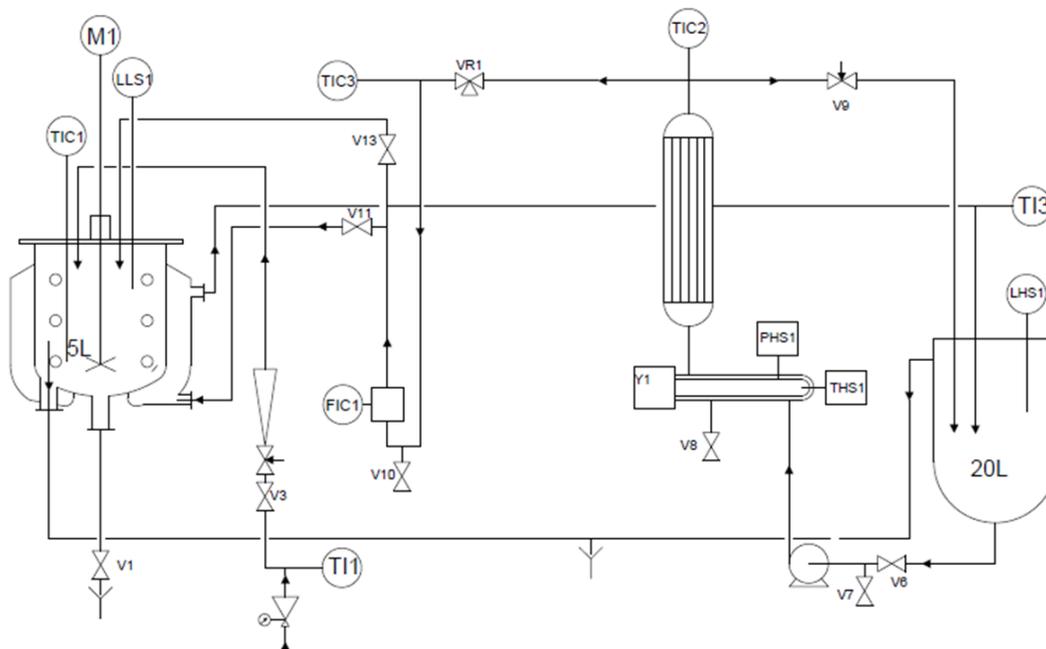


Fig. 2.12 Diagrama para la calefacción por camisa doble. Fuente: Propia

En la Tabla 2.20 se muestra las condiciones iniciales de la experimentación y en la Tabla 2.21, se observa el arreglo de válvulas para el acondicionamiento del fluido térmico y en la Tala 2.22 el arreglo para la ejecución de la experimentación.

Tabla 2.20 Condiciones iniciales para calefacción por camisa doble

Número de RPM	248-251
Temperatura del agua potable (°C)	---
Volumen de la cuba de vidrio (L)	5
Porcentaje de flujo (FIC1)	50-55

Tabla 2.21 Arreglo de válvulas para el acondicionamiento del fluido de calentamiento en el tanque de almacenamiento

Posicionamiento de válvulas

0: Cerrada

1: Abierta

RM: Reglaje Manual

V1	0
V2	0
V3	0
V4	0
V5	0
V6	1
V7	0
V8	0
V9	1
V10	0
V11	0
V12	0
V13	0
V14	0

Es importante enviar señal a la resistencia eléctrica del grupo Y2

Tabla 2.22 Arreglo de válvulas para la realización de la calefacción por camisa doble

Posicionamiento de válvulas			
	0: Cerrada	1: Abierta	RM: Reglaje Manual
	ANTES	DURANTE	DESPUES
V1	0	0	0
V2	0	0	0
V3	0	1	0
V4	0	0	0
V5	0	0	0
V6	1	1	1
V7	0	0	0
V8	0	0	0
V9	RM	RM	RM
V10	0	0	0
V11	1	1	1
V12	0	0	0
V13	0	0	0
V14	0	0	0

El punteo correspondiente en el tablero, se muestran a continuación:

Tabla 2.23 Arreglo en el tablero con cables banana para la realización de la calefacción por camisa doble.

Fuente: Propia

SEÑAL	R1	R2	VR1
Medida	TIC2	TIC1	
Salida	Y1		
Modo	Auto P=0.8 I=60 D=10	Man	
Consigna	45°C		
Gene 20mA			✓

- d. Calefacción por serpentín interno: Es el mismo caso que la camisa doble, pero difiere en que la válvula de alimentación de la camisa doble debe estar cerrada y la del serpentín abierta. La experimentación se llevó a cabo comenzado desde 23.1°C y alcanzando el valor promedio de 34.7°C.

En la Figura 2.13 se exponen los accesorios, las válvulas y corrientes de procesos que participan en esta experimentación.

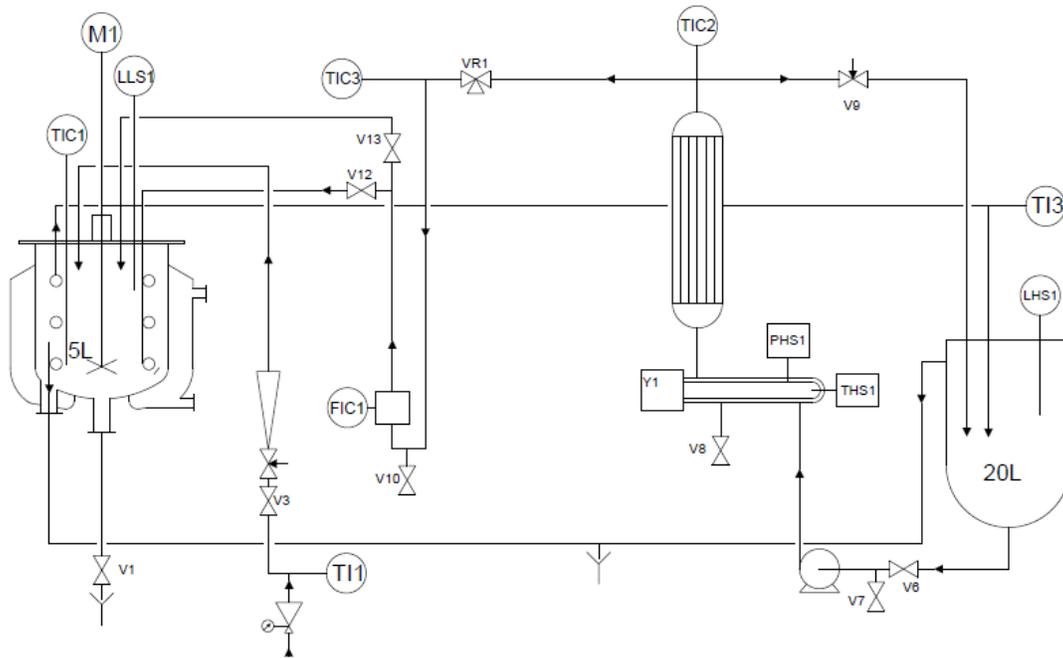


Fig. 2.13 Diagrama para la calefacción por serpentín. Fuente: Propia

Tabla 2.24 Condiciones iniciales para calefacción por serpentín interno

Número de RPM	248-251
Temperatura del agua potable (°C)	18.0
Volumen de la cuba de vidrio (L)	5
Porcentaje de flujo (FIC1)	50-55

Para el acondicionamiento del fluido de calentamiento del tanque de almacenamiento, la Tabla 2. 21 muestra el arreglo de válvulas necesario.

Y el arreglo de válvulas para llevar a cabo la calefacción por serpentín, se debe seguir los posicionamientos de las válvulas de la Tabla 2.22, difiriendo en que la válvula V11 debe estar cerrada y la válvula V12 abierta.

El puenteo correspondiente en el tablero, se muestran a continuación:

Tabla 2.25 Arreglo en el tablero con cables banana para la realización de la calefacción por serpentín interno.

Fuente: Propia

SEÑAL	R1	R2	VR1
Medida	TIC2	TIC1	
Salida	Y1		
Modo	Man	Man	
Consigna	45°C		
Gene 20mA			✓

e. Enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla: La prueba comienza acondicionando al fluido de enfriamiento, contenido en el tanque de almacenamiento, a la temperatura deseada. Paralelamente, la cuba de vidrio se llena con el fluido de trabajo y se calienta mediante la resistencia eléctrica sumergible, sin dejar de lado la agitación. Todo lo anterior, se realiza con un punteo correcto de los cables banana tanto en señales de activación como de visualización. Posteriormente, se realiza el rearrreglo del tablero y de las válvulas, de modo que la válvula de regulación neumática esté abierta al 50%. Por consiguiente, se abre la válvula del servicio de agua potable, ajustando su flujo a 200 L/h, también se deja que el fluido de enfriamiento comience a circular para mezclarse con el agua potable y así formar el fluido de enfriamiento que va a circular por la camisa doble. El estudio se llevó a cabo comenzado desde 43.2°C y alcanzando el valor promedio de 31.7°C.

En seguida, se expone en la Figura 2.14 tanto los accesorios, válvulas y líneas de proceso que intervienen en la realización del enfriamiento ya descrito.

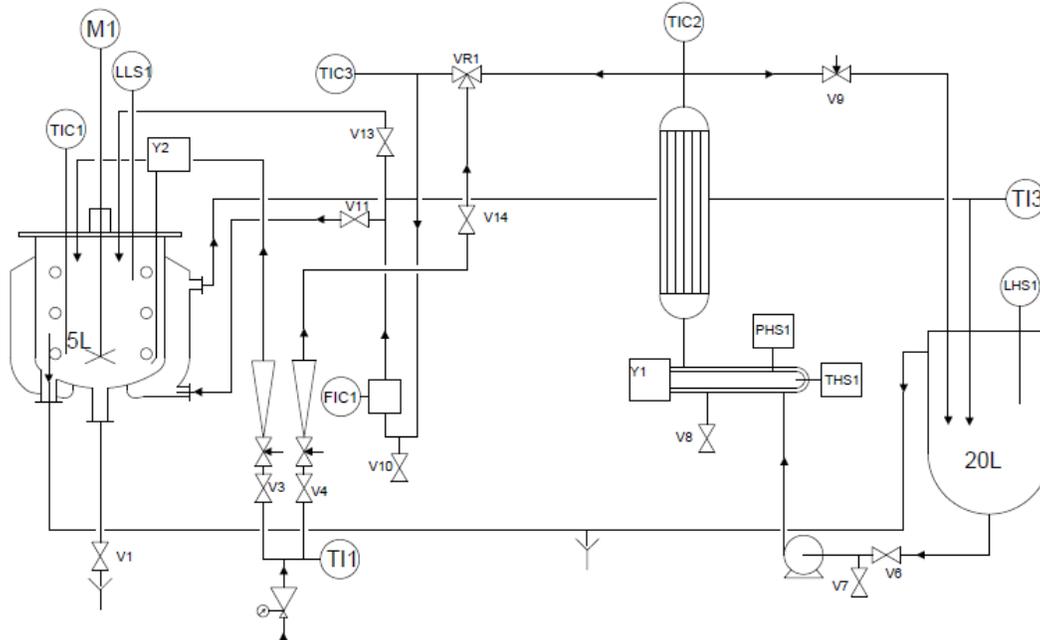


Fig. 2.14 Diagrama para el enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla. Fuente: Propia

En la Tabla 2.26 se muestra las condiciones iniciales de la experimentación y en la Tabla 2.27, se observa el arreglo de válvulas para el acondicionamiento del fluido térmico y en la Tala 2.28 el arreglo para la ejecución de la experimentación.

Tabla 2.26 Condiciones iniciales para el enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla

Número de RPM	248-251
Temperatura del agua potable (°C)	16.5
Volumen de la cuba de vidrio (L)	200
Porcentaje de flujo (FIC1)	5

Tabla 2.27 Arreglo de válvulas para el acondicionamiento del fluido de enfriamiento en el tanque de almacenamiento

Posicionamiento de válvulas

0: Cerrada

1: Abierta

RM: Reglaje Manual

V1	0
V2	0
V3	1 (cerrar después de llenado)
V4	0
V5	0
V6	1
V7	0
V8	0
V9	1
V10	0
V11	0
V12	0
V13	0
V14	0
Es importante enviar señal a la resistencia eléctrica del grupo Y2	

Tabla 2.28 Arreglo de válvulas para la realización del enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla

Posicionamiento de válvulas

0: Cerrada 1: Abierta

RM: Reglaje Manual

	ANTES	DURANTE
V1	0	0
V2	0	0
V3	1	0
V4	0	1
V5	0	0
V6	1	1
V7	0	0
V8	0	0
V9	RM	RM
V10	0	0
V11	1	1
V12	0	0
V13	0	0
V14	0	1

El puenteo correspondiente en el tablero, se muestran a continuación:

Tabla 2.29 Arreglo en el tablero con cables banana para la realización del enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla. Fuente: Propia

SEÑAL	R1	R2	VR1
Medida	TIC1	TIC2	
Salida	VR1		
Modo	Man	Man	
Consigna	50%		
Gene 20mA			

f. Enfriamiento por camisa doble e intercambiador de calor. Esta prueba es similar a la anterior, pero con las diferencias de que hay que dirigir el fluido del servicio de agua potable al intercambiador con la válvula correspondiente, así como abrir totalmente la válvula de regulación neumática para que el fluido de enfriamiento cruce hasta la camisa doble. El estudio se llevó a cabo comenzado desde 45.6°C y alcanzando el valor promedio de 35.9°C.

Por consiguiente, se visualiza en la Figura 2.15 todos los elementos implicados para llevar a cabo este enfriamiento.

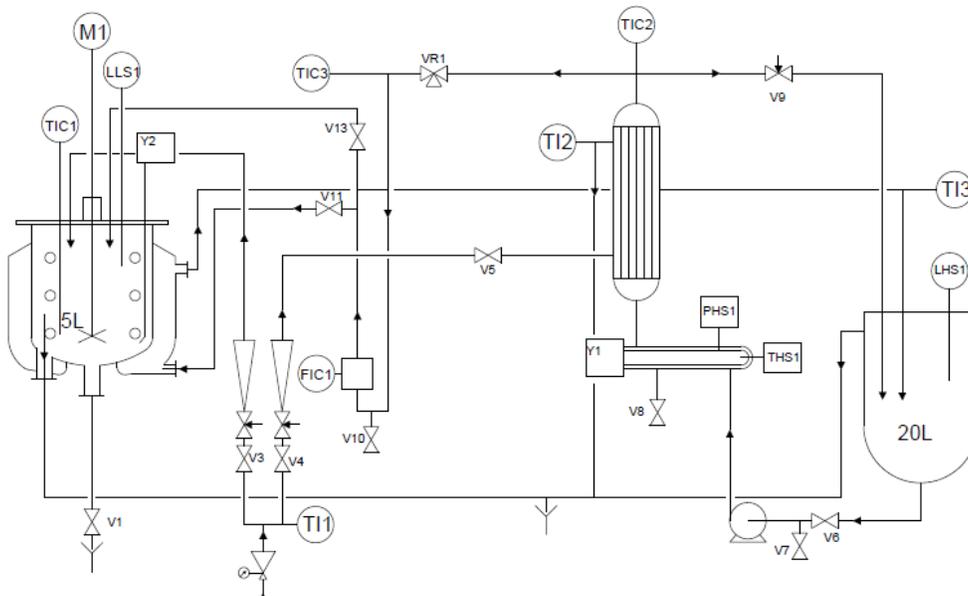


Fig. 2.15 Diagrama para el enfriamiento por camisa doble e intercambiador. Fuente: Propia

En la Tabla 2.30 se exponen las condiciones iniciales para el enfriamiento por camisa doble e intercambiador.

Tabla 2.30 Condiciones iniciales para el enfriamiento por camisa doble e intercambiador de calor

Número de RPM	248-251
Temperatura del agua potable (°C)	19.0
Volumen de la cuba de vidrio (L)	200
Porcentaje de flujo (FIC1)	5

El arreglo de válvulas para el acondicionamiento del fluido de enfriamiento en el tanque de almacenamiento se puede encontrar en la Tabla 2.27. Y la siguiente tabla muestra el arreglo de válvulas para la ejecución de esta experimentación.

Tabla 2.31 Arreglo de válvulas para la realización del enfriamiento por camisa doble e intercambiador de calor

Posicionamiento de válvulas
0: Cerrada 1: Abierta
RM: Reglaje Manual

	ANTES	DURANTE
V1	0	0
V2	0	0
V3	1	0
V4	0	1
V5	0	1
V6	1	1
V7	0	0
V8	0	0
V9	RM	RM
V10	0	0
V11	1	1
V12	0	0
V13	0	0
V14	0	0

El puenteo correspondiente en el tablero, se muestran a continuación:

Tabla 2.32 Arreglo en el tablero con cables banana para la realización del enfriamiento por camisa doble e intercambiador de calor. Fuente: Propia

SEÑAL	R1	R2	VR1
Medida	TIC1	TIC3	
Salida			
Modo	Man	Man	
Consigna			
Gene 20mA			✓

g. Enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla: Es igual al enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla, simplemente se diferencia en que se cambia a circulación por serpentín interno. El estudio se llevó a cabo comenzado desde 44.4°C y alcanzando el valor promedio de 26.7°C.

La Figura 2.16 ilustra los elementos involucrados para la realización de este enfriamiento.

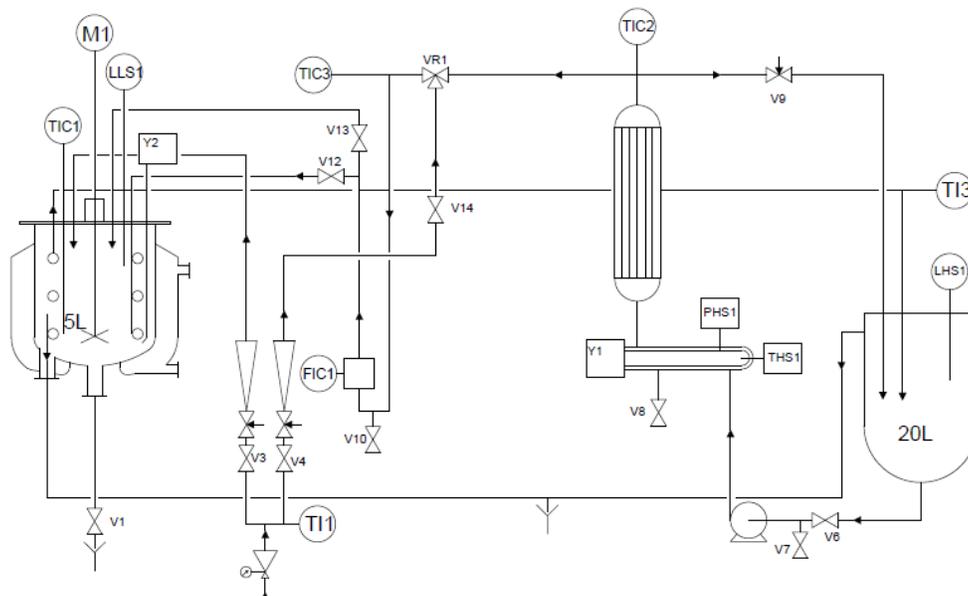


Fig. 2.16 Diagrama para el enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla. Fuente: Propia

En la Tabla 2.33 se exponen las condiciones iniciales para el enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla.

Tabla 2.33 Condiciones iniciales para el enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla

Número de RPM	248-251
Temperatura del agua potable (°C)	---
Volumen de la cuba de vidrio (L)	200
Porcentaje de flujo (FIC1)	5

El arreglo de válvulas para el acondicionamiento del fluido de enfriamiento en el tanque de almacenamiento se puede encontrar en la Tabla 2.27. Y la siguiente tabla muestra el arreglo para llevar a cabo las pruebas de esta configuración de enfriamiento.

Tabla 2.34 Arreglo de válvulas para la realización del enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla

Posicionamiento de válvulas**0: Cerrada 1: Abierta****RM: Reglaje Manual**

	ANTES	DURANTE
V1	0	0
V2	0	0
V3	1	0
V4	0	1
V5	0	0
V6	1	1
V7	0	0
V8	0	0
V9	RM	RM
V10	0	0
V11	0	0
V12	1	1
V13	0	0
V14	0	1

El puenteo correspondiente en el tablero, se muestran a continuación:

Tabla 2.35 Arreglo en el tablero con cables banana para la realización del enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla. Fuente: Propia

SEÑAL	R1	R2	VR1
Medida	TIC1	TIC3	
Salida	VR1		
Modo	Man	Man	
Consigna	50%		
Gene 20mA			

h. Enfriamiento por serpentín e intercambiador de calor: Se asemeja al enfriamiento por camisa doble e intercambiador de calor, con la diferencia de que se modifica a circulación por serpentín interno. El estudio se llevó a cabo comenzado desde 47°C y alcanzando el valor promedio de 29.53°C.

Enseguida, se muestra en la Figura 2.17 el diagrama que involucra todos los elementos para la realización de esta experimentación.

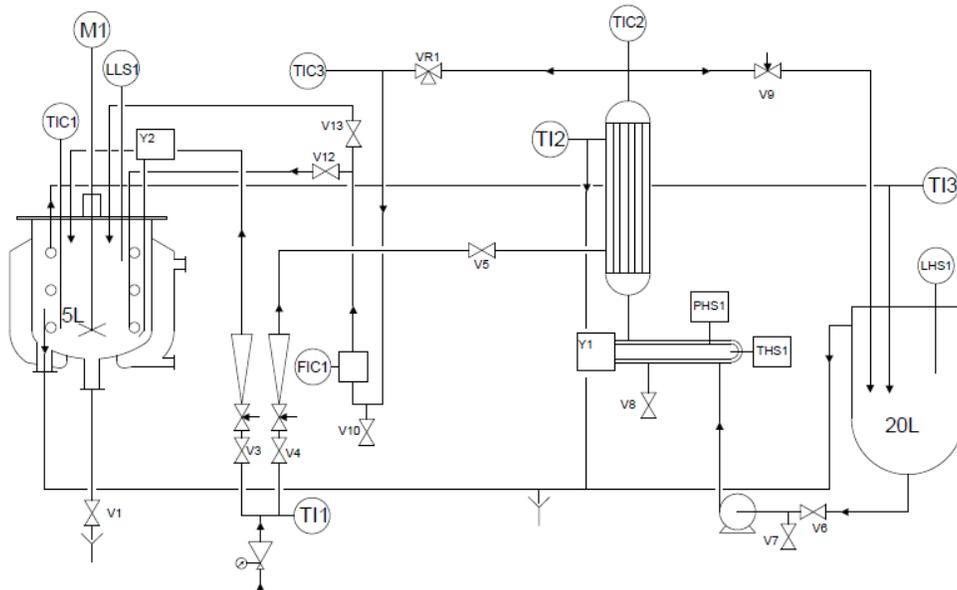


Fig. 2.17 Diagrama para el enfriamiento por serpentín e intercambiador. Fuente: Propia

En la Tabla 2.36 se exponen las condiciones iniciales para el enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla.

Tabla 2.36 Condiciones iniciales para el enfriamiento por serpentín e intercambiador de calor

Número de RPM	248-251
Temperatura del agua potable (°C)	18.0
Volumen de la cuba de vidrio (L)	200
Porcentaje de flujo (FIC1)	5

El arreglo de válvulas para el acondicionamiento del fluido de enfriamiento en el tanque de almacenamiento se puede encontrar en la Tabla 2.27.

Tabla 2.37 Arreglo de válvulas para la realización del enfriamiento por serpentín e intercambiador de calor

Posicionamiento de válvulas

0: Cerrada 1: Abierta

RM: Reglaje Manual

	ANTES	DURANTE
V1	0	0
V2	0	0
V3	1	0
V4	0	1
V5	0	1
V6	1	1
V7	0	0
V8	0	0
V9	RM	RM
V10	0	0
V11	0	0
V12	1	1
V13	0	0
V14	0	0

El punteo correspondiente en el tablero, se muestran a continuación:

Tabla 2.38 Arreglo en el tablero con cables banana para la realización del enfriamiento por serpentín e intercambiador de calor. Fuente: Propia

SEÑAL	R1	R2	VR1
Medida	TIC1	TIC3	
Salida			
Modo	Man	Man	
Consigna			
Gene 20mA			✓

- Realización de la práctica propuesta para evaluar la transferencia de calor con una solución de salmuera para determinar si se utiliza como fluido de enfriamiento o como fluido de calentamiento, mediante 2 pruebas de calentamiento, una por serpentín y otra por chaqueta de vidrio, y mediante 2 pruebas de enfriamiento, también por serpentín y chaqueta de vidrio respectivamente, pero usando enfriamiento por intercambiador.

CAPÍTULO 3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se podrán observar los resultados de las pruebas con agua realizadas en el equipo de Cuba Térmica, para todas las configuraciones ya descritas en metodología. Cada tabla contiene tres pruebas realizadas, así como el promedio que se usó para determinar el perfil de velocidad de transferencia de calor y dentro del perfil es posible observar las barras de error que tienen su origen en la desviación estándar.

Por consiguiente, se desarrolla el Manual de Operación de la Cuba Térmica, con la descripción detallada de cómo llevar a cabo cada experimentación, teniendo en cuenta las precauciones necesarias, así como notas adicionales para un mejor manejo del equipo.

En última instancia, se presenta la práctica propuesta, los valores de temperaturas dentro de tablas, el perfil de velocidad de transferencia de calor, el cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de calor y del coeficiente global de transferencia de calor, así como el perfil de calor (Q) vs tiempo (t).

3.1 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN DEL EQUIPO

Para la realización de las pruebas de verificación, simplemente se hizo fluir agua por el equipo, con la finalidad de limpieza del mismo, poder checar que los instrumentos estuvieran calibrados correctamente así como saber en qué puntos había existencia de fugas.

Se encontró fuga a la salida de la camisa doble, la cual se resolvió satisfactoriamente. Además se determinó que existía una incorrecta calibración del sistema electrónico del tablero de control, el cual fue resuelto con la ayuda del diagrama eléctrico facilitado por el fabricante.

3.2 PRUEBAS EN LA CUBA TÉRMICA CON AGUA

Las pruebas con agua involucran los diferentes medios de calefacción y enfriamientos expuestos en el Capítulo 2 Metodología.

En la siguiente tabla se define la simbología general de las temperaturas medidas en el equipo de Cuba Térmica, para una mayor comprensión de las tablas expuestas posteriormente.

Tabla 3.39 Simbología de la cuba térmica. Fuente: Propia

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
TIC1	Temperatura de la cuba agitada en °C
TIC2	Temperatura de salida del fluido caliente en el intercambiador de coraza y tubos en °C
TIC3	Temperatura a la entrada del serpentín/camisa doble en °C
TI1	Temperatura de entrada del agua potable, para llenado de la cuba en °C
TI2	Temperatura de la salida del fluido frío en el intercambiador de coraza y tubos en °C
TI3	Temperatura a la salida de la camisa doble en °C

Se han reportado coeficientes globales de transferencia de calor cuando una salmuera fluye a través de una chaqueta de acero al carbón revestido de vidrio y el fluido a calentar/enfriar es agua, de 170 a 450 J/m^2*s*K (Perry, 1999), Aunado a lo anterior, cuando una solución acuosa fluye a través de un serpentín sumergido y el fluido a calentar/enfriar es agua en agitación, se reportan valores de coeficiente global de transferencia de calor de 400 a 700 J/m^2*s*K (ISIS Steam, 2015).

3.2.1 CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE

Tabla 3.40 Resultados de calefacción por resistencia eléctrica. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio Pruebas	
				TIC1 (°C)	Desviación estándar (σ)
0	17	17	17	TIC1 _{prom} (°C)	0
0.5	18.1	18.1	18.1	18.1	0
0.666	18.5	18.4	18.4	18.4	0.058
0.833	18.9	18.8	18.7	18.8	0.100
1	19.3	19.1	19.1	19.2	0.115
1.166	19.6	19.5	19.5	19.5	0.058
1.333	19.9	19.9	19.8	19.9	0.058
1.5	20.3	20.3	20.2	20.3	0.058
1.666	20.7	20.6	20.5	20.6	0.100
1.833	21	21	20.9	21.0	0.058
2	21.4	21.4	21.3	21.4	0.058
2.5	22.5	22.5	22.4	22.5	0.058
3	23.6	23.6	23.5	23.6	0.058
3.5	24.7	24.9	24.6	24.7	0.153
4	25.9	26	25.8	25.9	0.100
5	28	28.5	28	28.2	0.289
6	30.2	30.6	30.2	30.3	0.231
7	32.3	32.8	32.4	32.5	0.265
8	34.4	35.1	34.5	34.7	0.379
9	36.5	37.3	36.6	36.8	0.436
10	38.5	39.5	38.7	38.9	0.529
11	40.5	41.6	40.9	41.0	0.557
12	42.6	43.8	43	43.1	0.611
13	44.6	45.9	45.1	45.2	0.656
14	46.6	48	47.1	47.2	0.709
15	48.5	50.1	49.1	49.2	0.808
16	50.5	52.2	51.1	51.3	0.862
17	52.3	54.2	53	53.2	0.961
18	54.1	56.1	55	55.1	1.002
19	55.9	58.1	57	57.0	1.100
20	57.7	60.1	59	58.9	1.201

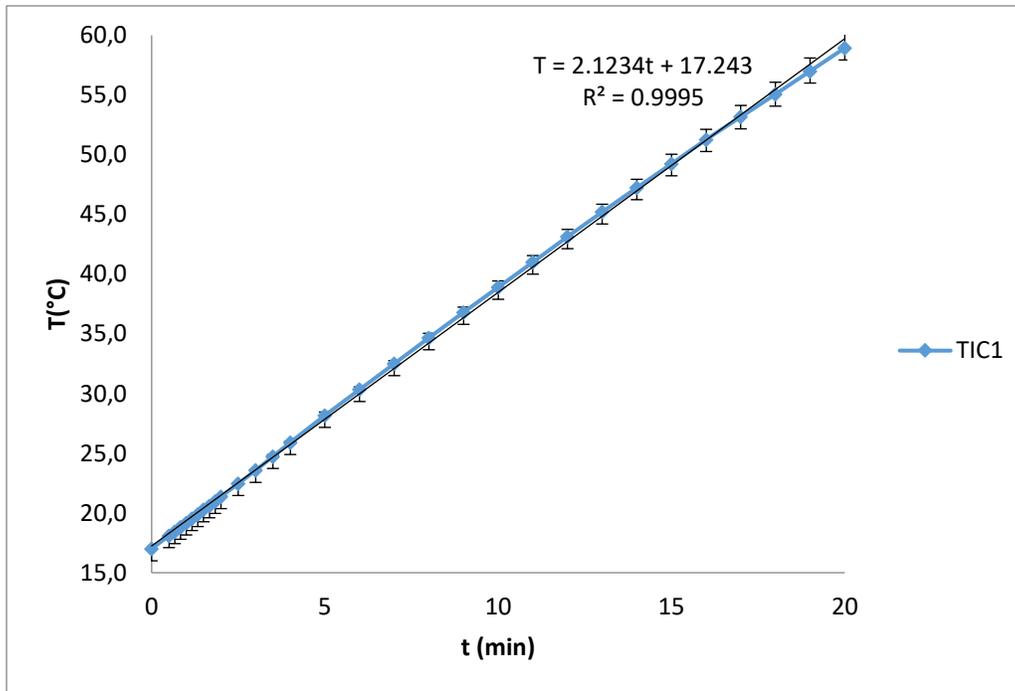


Fig. 3.18 Perfil de calefacción por resistencia eléctrica sumergible. Fuente: Propia

Como se puede observar, el perfil de la Figura 3.18, basado en los datos promedios de la Tabla 3.40, tienen un comportamiento lineal. Esto significa que la calefacción por medio de resistencia eléctrica sumergible tiene un incremento constante y es controlada, sin embargo resulta económicamente viable sólo en pequeñas cantidades, como en este caso, en donde el volumen es de 5 litros, debido a que en mayores cantidades el gasto energético sería desmesurado, ya que se requieren más resistencias calefactoras. Las barras de error mostradas en la Figura 4.8, demuestran que la desviación de los datos de cada experimentación realizada con respecto al valor promedio, es prácticamente nula.

3.2.2 CALEFACCIÓN POR CIRCULACIÓN EXTERNA

Tabla 3.41 Resultados de calefacción por circulación externa. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio Pruebas	
	TIC1(°C)	TIC1(°C)	TIC1(°C)	TIC1 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ)
0	16.6	16.6	16.6	16.6	0
0.5	18.2	18.1	17.3	17.9	0.493
1	20	19.9	18.7	19.5	0.723
1.5	21.9	21.7	20.4	21.3	0.814
2	23.8	23.6	21.9	23.1	1.044
2.5	25.7	25.4	23.9	25.0	0.964
3	27.5	27.1	25.6	26.7	1.002
4	31.1	30.5	29.1	30.2	1.026
5	34.6	33.8	32.5	33.6	1.060
6	38	37	36.1	37.0	0.950
7	41.4	40.1	39.8	40.4	0.850
8	44.7	43.2	43.5	43.8	0.794
9	48	46.2	46.8	47.0	0.917
10	51.2	49.1	50.3	50.2	1.054

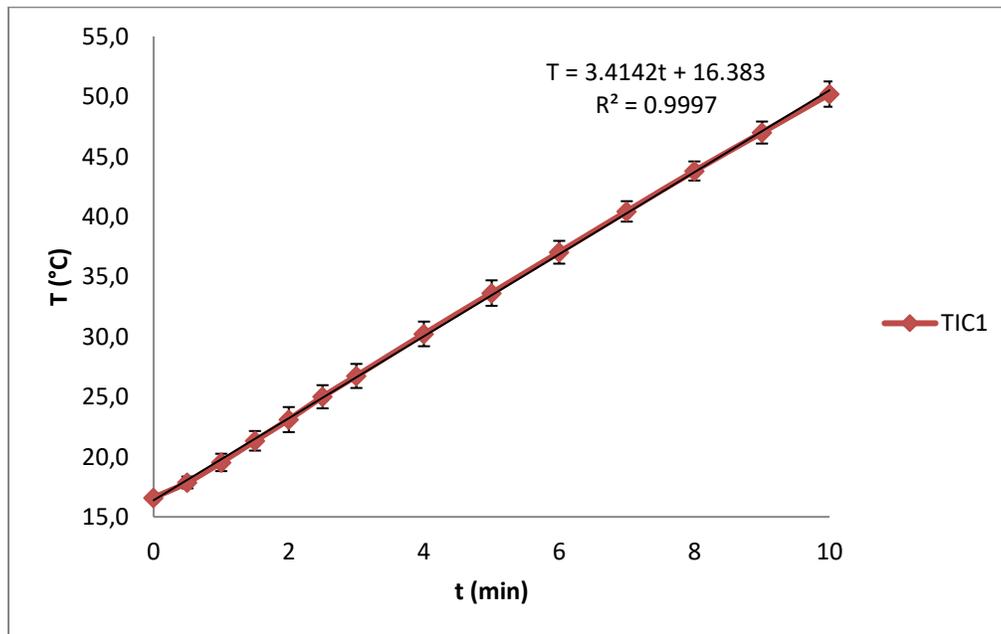


Fig. 3.19 Perfil de calefacción por circulación externa. Fuente: Propia

Este estudio de calefacción, al igual que el anterior, demostró tener un comportamiento de linealidad, según el perfil arrojado en la Figura 3.19, ya que el fluido de estudio se calienta también por una resistencia, pero en este caso es externa. Las barras de error indican la repetitividad de los experimentos.

En contraste con la información del fabricante, hay dos diferencias importantes en la operación del equipo. La primera es que la válvula de recirculación V2 es una válvula de paso total, y por lo tanto no es una buena reguladora de flujo. Aunado a ello, el porcentaje de flujo propuesto por el fabricante es bajo dado que hay evidencia de la presencia de burbujas de aire. Para evitar esta situación, se propuso utilizar un flujo mayor, el cual se logró aumentando el porcentaje de abertura de la válvula V6. Mientras que, la segunda razón, fue la temperatura ambiente, ya que la prueba no se realizó a las mismas condiciones que se reportan en la información proporcionada por el fabricante.

Es viable, igual que el estudio anterior en pequeños volúmenes de fluido.

3.2.3 CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE

Tabla 3.42 Resultados de calefacción por camisa doble. Fuente: Propia

t(min)	TIC1 (°C)	TIC2 (°C)	TI3 (°C)	TIC1 (°C)	TIC2 (°C)	TI3 (°C)	TIC1 (°C)	TIC2 (°C)	TI3 (°C)
0	20.5	44.9	42.9	20.5	45.1	42.6	20.5	47.7	44.7
0.5	21.4	45	43.2	21.2	45.1	42.9	21.4	47.4	44.8
1	22.2	45	43.3	21.8	45.3	42.8	22.2	47.2	44.8
1.5	23	45	43.4	22.5	45	42.9	23	46.9	44.7
2	23.7	45.1	43.5	23.3	45.3	43	23.8	46.8	44.7
2.5	24.4	45	43.6	24	45	43.1	24.5	46.6	44.6
3	25.2	45.1	43.7	24.6	45.1	43.1	25.2	46.5	44.6
3.5	25.9	45	43.7	25.2	45	43.2	25.9	46.3	44.6
4	26.5	45	43.8	25.9	45.1	43.2	26.5	46.1	44.4
4.5	27.2	45.1	43.8	26.5	45	43.3	27.2	46	44.4
5	27.8	45	43.9	27.1	45.1	43.4	27.8	45.9	44.3
5.5	28.4	45.1	44	27.7	45	43.4	28.4	45.7	44.3
6	29	45	44	28.2	45.1	43.5	28.9	45.6	44.2
6.5	29.5	45.1	44.1	28.8	45	43.5	29.5	45.5	44.2
7	30	45	44.1	29.3	45.1	43.6	29.9	45.4	44.7
7.5	30.6	45.1	44.2	29.8	44.9	43.6	30.5	45.3	44.1
8	31	45	44.2	30.3	45.1	43.7	30.9	45.1	44
8.5	31.5	45.1	44.3	30.7	44.9	43.8	31.4	45.1	44
9	32	45	44.3	31.1	45.1	43.8	31.8	45	43.9
9.5	32.4	45.1	44.3	31.6	45	43.9	32.2	44.9	43.9
10	32.8	45	44.3	32	45.1	43.9	32.6	45.1	44

Promedio Pruebas	
TIC1 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ)
20.5	0
21.3	0.115
22.1	0.231
22.8	0.289
23.6	0.265
24.3	0.265
25.0	0.346
25.7	0.404
26.3	0.346
27.0	0.404
27.6	0.404
28.2	0.404
28.7	0.436
29.3	0.404
29.7	0.379
30.3	0.436
30.7	0.379
31.2	0.436
31.6	0.473
32.1	0.416
32.5	0.416

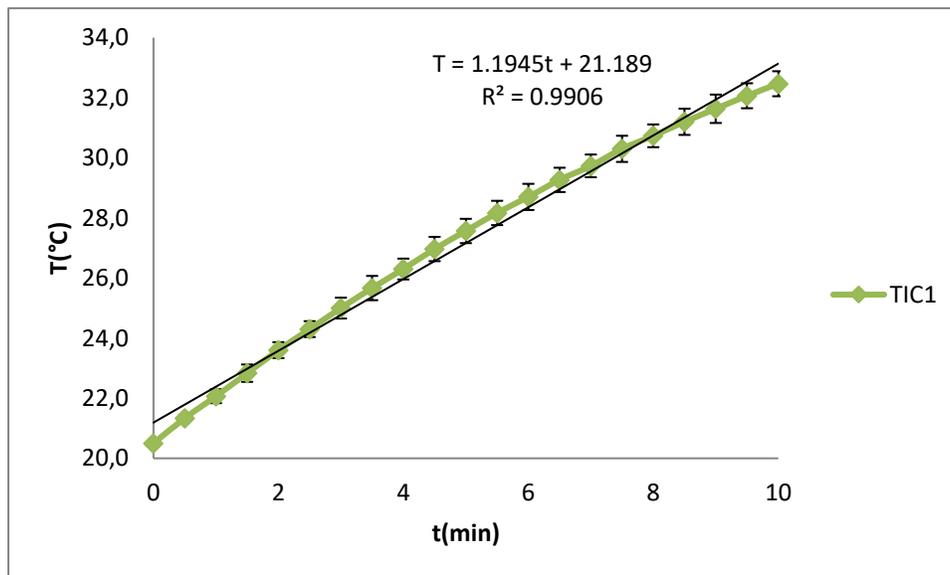


Fig. 3.20 Perfil de calefacción por camisa doble. Fuente: Propia

Los resultados de calefacción por camisa doble se encuentran dentro de un rango aceptable de linealidad, como se aprecia en la Figura 3.20. Las barras de error

son muy cerradas, indicando muy baja variación entre cada evaluación realizada, con respecto a la media.

Por otro lado, durante las pruebas experimentales, la presencia de un flujo bifásico originó que se utilizara un flujo de calentamiento recirculado mayor al propuesto por el fabricante, de 25% a 50 – 55%, representando 720 L/h el 100%.

En las tres pruebas que se reportan en la Tabla 3.42, la TIC2 y la TI3 son diferentes, siendo la TIC2 ligeramente mayor. La TIC2 indica la entrada del fluido caliente a la camisa doble, y la TI3 la salida del fluido caliente de la camisa doble. Una vez que el fluido caliente cedió parte de su calor sensible para calentar al fluido de trabajo, su temperatura disminuye de manera lógica. Estos resultados también avalan el buen funcionamiento de la resistencia externa del grupo, debido a que a lo largo de las tres pruebas el fluido caliente recupera su temperatura para volver a ceder calor al fluido de trabajo.

3.2.4 CALEFACCIÓN POR SERPENTIN

Tabla 3.43 Resultados de calefacción por serpentín. Fuente: Propia

t(min)	Prueba			Promedio Pruebas	
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	TIC1 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ)
0	23.1	23.1	23.1	23.1	0
0.2833	24.3	24	24.2	24.2	0.153
0.4333	25	25.2	24.8	25.0	0.200
0.5333	25.5	25.6	25.2	25.4	0.208
0.65	26	26.1	25.8	26.0	0.153
0.75	26.5	26.7	26.4	26.5	0.153
0.8666	26.9	27	26.8	26.9	0.100
0.9666	27.4	27.5	27.2	27.4	0.153
1.083	27.8	28	27.9	27.9	0.100
1.2	28.3	28.4	28.4	28.4	0.058
1.316	28.8	28.9	28.8	28.8	0.058
1.466	29.3	29.5	29.2	29.3	0.153
1.583	29.7	29.9	29.6	29.7	0.153
1.716	30.2	30.4	30	30.2	0.200
1.866	30.8	31	30.9	30.9	0.100
2	31.2	31.6	31.7	31.5	0.265
2.333	32.3	32.5	32.6	32.5	0.153
2.683	33.3	33.7	33.5	33.5	0.200
3.083	34.4	34.8	34.9	34.7	0.265

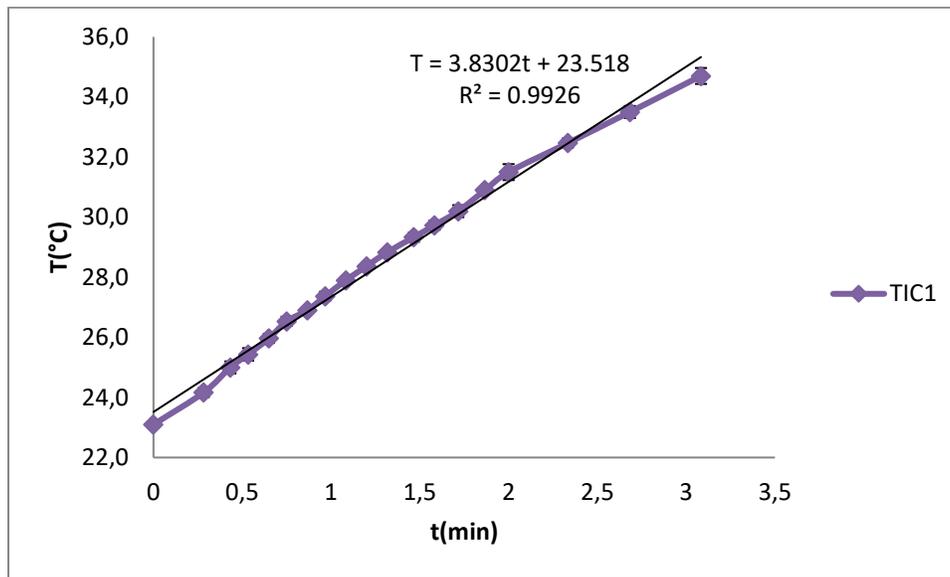


Fig. 3.21 Perfil de calefacción por serpentín. Fuente: Propia

El aumento de temperatura con respecto al tiempo, también tiene una tendencia lineal, según el perfil de la Figura 3.21, cabe resaltar que la desviación estándar de los resultados, hallada en la Tabla 3.43, no supera el valor de 0.265, que se traduce a que los datos experimentales no tienen un coeficiente de variación mayor a 0.84%, lo cual aumenta la confiabilidad de los resultados.

Los resultados en comparación con la información del fabricante resultan ser hasta 0.5°C mayor que los reportados por el fabricante, debido al aumento del flujo establecido anteriormente (de 25% a 50-55%, recordando que el 100% son 720 l/h) para evitar burbujas dentro del equipo, sin embargo, tiene una tendencia semejante.

Se puede notar que, en 3 minutos, la calefacción por medio del serpentín alcanza en promedio 34.7°C , lo cual lo convierte en el medio más rápido de calentamiento que los anteriores estudios. Lo anterior es comprobado al comparar la pendiente de la calefacción por serpentín interno la cual es de 3.8302, siendo mayor que las demás (2.1234 para resistencia eléctrica sumergible, 3.4142 para resistencia eléctrica externa y 1.1945 para camisa doble).

También es necesario mencionar que debido a la rapidez con la que se debía tomar los datos de las experimentaciones, fue muy difícil obtener los valores de la salida del serpentín, ya que esos valores los arroja el termómetro bimetálico que se encuentra en la parte trasera del tanque de almacenamiento, en el otro extremo del equipo, y por tal motivo no aparecen reportados.

3.2.5 ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA

Tabla 3.44 Resultados de enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3		
	TIC1(°C)	TIC2 (°C)	TI3(°C)	TIC1(°C)	TIC2 (°C)	TI3(°C)	TIC1(°C)	TIC2 (°C)	TI3(°C)
0	43.2	38.6	25.6	43.2	41.8	26.4	43.2	36.6	28
0.5	42.5	37.2	25.2	42.5	40.3	25.8	42.4	34.7	25.4
1	41.8	36	24.7	41.8	38.8	25.4	41.7	33.2	24.2
1.5	41	34.8	24.3	41.1	37.2	24.9	41.1	31.9	23.3
2	40.3	33.7	23.9	40.4	36.1	24.5	40.4	30.7	22.8
2.5	39.7	32.7	23.5	39.7	34.9	24.1	39.8	29.5	22.5
3	39	31.7	23.2	39.1	33.8	23.8	39.1	28.6	22.5
3.5	38.4	30.8	22.9	38.5	32.7	23.4	38.3	27.7	22.2
4	37.7	30	22.6	37.8	31.7	23.1	38	26.8	21.9
4.5	37.1	29.4	22.4	37.3	30.9	22.8	37.4	26.1	21.9
5	36.5	28.5	22.1	36.6	30	22.6	36.8	25.3	21.7
6	35.4	27.3	21.7	35.5	28.5	22.1	35.8	24.1	21.6
7	34.2	26.1	21.2	34.4	27.3	21.4	34.8	23.1	21.4
8	33.2	25.2	20.9	33.4	26.1	21.4	33.9	22.2	21.2
9	32.2	24.3	20.5	32.5	25.2	21	33	21.4	21.1
10	31.3	23.5	20.2	31.5	24.4	20.7	32.2	20.8	21.1

TIC1 _{promedio} (°C)	TIC2 _{promedio} (°C)	TI3 _{promedio} (°C)	Desviación estándar TIC1 (σ)	Desviación estándar TIC2 (σ)	Desviación estándar TI3 (σ)
43.2	39.0	26.7	0	2.62	1.22
42.5	37.4	25.5	0.058	2.81	0.31
41.8	36.0	24.8	0.058	2.80	0.60
41.1	34.6	24.2	0.058	2.65	0.81
40.4	33.5	23.7	0.058	2.71	0.86
39.7	32.4	23.4	0.058	2.72	0.81
39.1	31.4	23.2	0.058	2.62	0.65
38.4	30.4	22.8	0.100	2.52	0.60
37.8	29.5	22.5	0.153	2.49	0.60
37.3	28.8	22.4	0.153	2.46	0.45
36.6	27.9	22.1	0.153	2.40	0.45
35.6	26.6	21.8	0.208	2.27	0.26
34.5	25.5	21.3	0.306	2.16	0.12
33.5	24.5	21.2	0.361	2.04	0.25
32.6	23.6	20.9	0.404	1.99	0.32
31.7	22.9	20.7	0.473	1.87	0.45

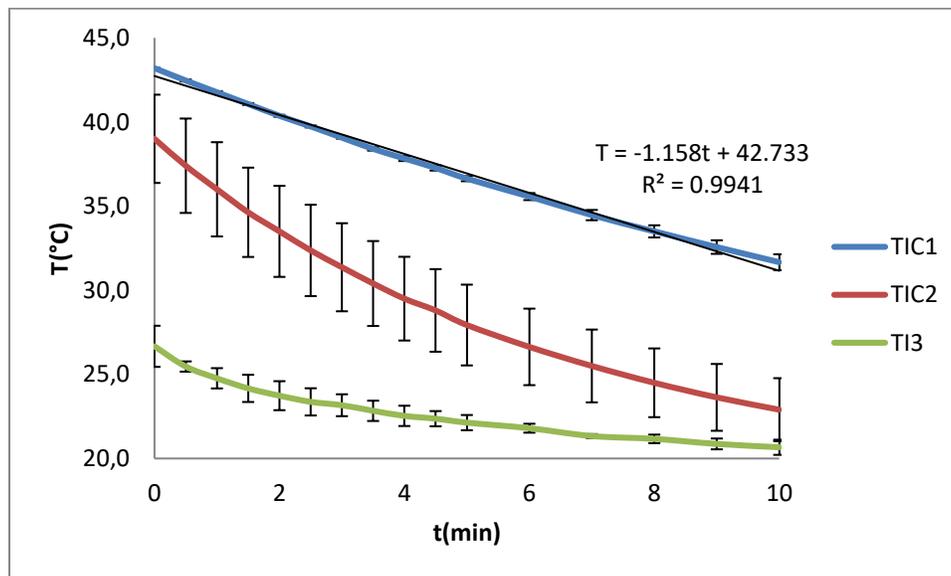


Fig. 3.22 Perfil de enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla. Fuente: Propia

En esta prueba se puede observar en la Figura 3.22 que el fluido de trabajo tiende a enfriarse linealmente (TIC1), y las barras de error indican poca variación en

cuanto a los ensayos realizados . El perfil de temperatura del fluido de enfriamiento que sale del intercambiador (TIC2), indica que este fluido se va enfriando a lo largo del tiempo que dura la prueba, además, es evidente que hay un rango amplio de variación entre los datos obtenidos. Esto último se explica en términos del medio de enfriamiento que se usa en el experimento, agua de enfriamiento contenida en el tanque de almacenamiento sin un control de temperatura.

Respecto al perfil de temperatura del fluido que sale del intercambiador (TI3), resulta un tanto contradictorio que el fluido de enfriamiento vaya disminuyendo su temperatura, ya que experimenta una ganancia de calor procedente del fluido de trabajo (cuba), sin embargo, su tendencia es disminuir. Para explicar esta situación, se debe recordar que al inicio de esta prueba el fluido de enfriamiento fue acondicionado a una determinada temperatura, por lo tanto, al mezclarse con el fluido de enfriamiento remanente del tanque de almacenamiento, no solo se elimina el calor que le fue suministrado por el fluido de trabajo, sino que también se elimina el calor que tiene por el hecho de haber sido acondicionado al inicio del experimento, además, se debe recordar que en ningún momento el fluido de enfriamiento remanente (tanque de almacenamiento), tiene un control de temperatura. Por último, la temperatura del fluido de enfriamiento a la salida de la camisa doble (TI3), también disminuye a lo largo del experimento, pero con valores inferiores a las temperaturas registradas a la salida del intercambiador de calor, esto se debe a que el fluido de enfriamiento también se mezcla directamente con agua potable, que tiene una temperatura entre 16 y 16.5°C.

Las barras de error para TIC1 y TI3 son bastante estrechas lo cual indica poca variabilidad, no así para TIC2, en donde las barras de error tienen un rango amplio de variación, debido al mezclado del fluido de enfriamiento procedente de la camisa doble, y el fluido de enfriamiento en el tanque de almacenamiento.

3.2.6 ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tabla 3.45 Resultados de enfriamiento por camisa doble e intercambiador de calor. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3		
	TIC1(°C)	TIC3 (°C)	TI2(°C)	TIC1(°C)	TIC3 (°C)	TI2(°C)	TIC1(°C)	TIC3 (°C)	TI2(°C)
0	45.6	38.8	29.2	45.6	37.7	28.3	45.6	33.3	26.3
0.5	45.3	38	28.6	45.3	37.1	28.2	45.1	32.8	26.1
1	45	37.3	28.2	44.9	36.3	27.8	44.6	32.4	25.9
1.5	44.7	36.6	27.9	44.5	35.8	27.1	44.1	31.9	25.8
2	44.2	36	27.4	44.1	35.2	26.9	43.5	31.5	25.6
2.5	43.9	35.4	27.1	43.8	34.6	26.6	43.1	31.1	25.3
3	43.5	34.8	26.9	43.3	34	26.4	42.5	30.7	25.1
3.5	43.1	34.2	26.6	42.9	33.5	26.1	42	30.4	24.9
4	42.7	33.6	26.3	42.5	33	25.8	41.5	30	24.9
4.5	42.3	33.2	26	42.1	32.5	25.5	41.1	29.6	24.6
5	41.9	31.6	25.8	41.7	32.1	25.3	40.6	29.4	24.5
6	41.1	31.8	25.4	40.9	31.2	24.8	39.7	28.8	24.2
7	40.3	31	24.9	40.1	30.4	24.3	38.8	28.2	24
8	39.5	30.2	24.5	39.3	29.7	24.1	38	27.8	23.7
9	38.7	29.5	24.4	38.5	29	23.9	37.2	27.3	23.5
10	38	28.9	23.9	37.7	28.5	23.8	36.4	26.9	23.3
11	37.2	28.4	23.6	37	28	23.4	35.6	26.5	23.2
12	36.5	27.8	23.5	36.2	27.5	23.2	34.9	26.1	23

TIC1 _{promedio} (°C)	TIC3 _{promedio} (°C)	TI2 _{promedio} (°C)	Desviación estándar TIC1 (σ)	Desviación estándar TIC3 (σ)	Desviación estándar TI2 (σ)
45.6	36.6	27.9	0	2.91	1.48
45.2	36.0	27.6	0.12	2.78	1.34
44.8	35.3	27.3	0.21	2.59	1.23
44.4	34.8	26.9	0.31	2.51	1.06
43.9	34.2	26.6	0.38	2.40	0.93
43.6	33.7	26.3	0.44	2.29	0.93
43.1	33.2	26.1	0.53	2.17	0.93
42.7	32.7	25.9	0.59	2.02	0.87
42.2	32.2	25.7	0.64	1.93	0.71
41.8	31.8	25.4	0.64	1.91	0.71
41.4	31.0	25.2	0.70	1.44	0.66
40.6	30.6	24.8	0.76	1.59	0.60
39.7	29.9	24.4	0.81	1.47	0.46
38.9	29.2	24.1	0.81	1.27	0.40
38.1	28.6	23.9	0.81	1.15	0.45
37.4	28.1	23.7	0.85	1.06	0.32
36.6	27.6	23.4	0.87	1.00	0.20
35.9	27.1	23.2	0.85	0.91	0.25

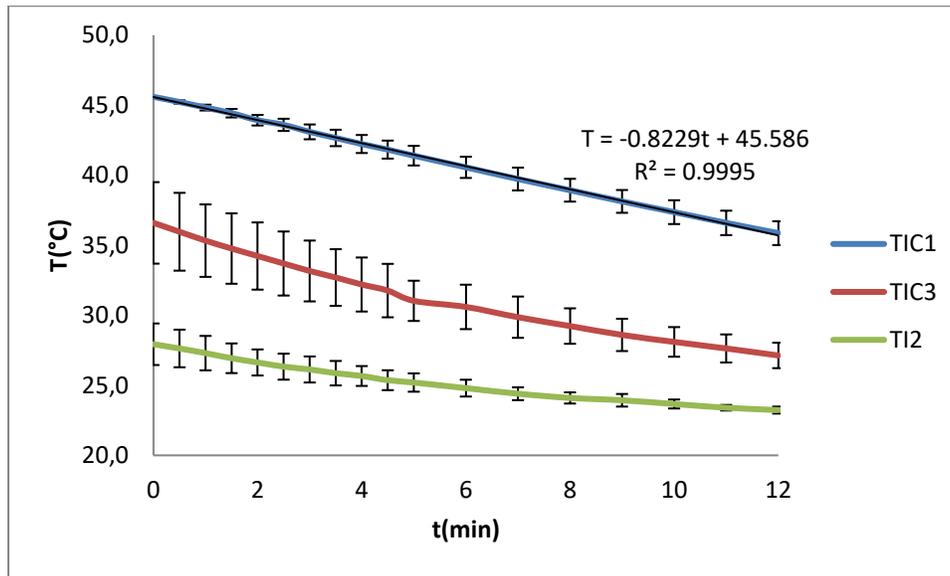


Fig. 3.23 Perfil de enfriamiento por camisa doble e intercambiador. Fuente: Propia

Este estudio indicó, como se muestra en la Figura 3.23, que el enfriamiento del fluido de trabajo tiene un comportamiento lineal, similar al enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla. La temperatura del fluido de enfriamiento a la salida del intercambiador de calor (TIC2), que en este caso es la misma que TIC3 por el hecho de que la válvula de mezcla se encuentra completamente cerrada para el paso de agua potable, también disminuye. En este mismo sentido, la temperatura de salida del fluido de enfriamiento (agua potable) del intercambiador de calor (TI2), también disminuye, sin embargo, su tasa de decremento es muy pequeña y tiende a ser constante.

Al igual que en el caso de enfriamiento por camisa doble y válvula de mezcla, TIC2 va disminuyendo porque el fluido de enfriamiento que abandona la camisa doble se mezcla con el fluido de enfriamiento remanente del tanque de almacenamiento, que no cuenta con un control de temperatura.

También es menester mencionar que, en el intercambiador de calor, el flujo del agua fría (200 L/h) es bajo en comparación al del fluido de enfriamiento, el cual es el fluido caliente desde la perspectiva del intercambiador, (360 L/h) y por lo tanto

puede no haber un tiempo suficiente de contacto, lo cual conlleva a una transferencia de calor hasta cierto punto incompleta.

Las barras de error de los perfiles de temperaturas TIC1 y TI2, junto con las desviaciones estándar de estas temperaturas, calculadas en la Tabla 4.7, indican poca varianza de los datos experimentales, que se traduce en un buen funcionamiento del equipo, tanto en el proceso de enfriamiento del fluido de trabajo, como el funcionamiento del intercambiador de calor del grupo.

La información que proporciona el fabricante no contempla la temperatura de salida del fluido de enfriamiento del intercambiador de calor (TI2), sin embargo, para garantizar un adecuado funcionamiento de todos los componentes de la Cuba Térmica, se analizó su perfil de temperaturas, y como ya se discutió con anterioridad su tasa de disminución fue muy pequeña, con valores muy bajos de desviación estándar después de 7 minutos de operación (Fig. 3.23).

3.2.7 ENFRIAMIENTO POR SERPENTIN Y VÁLVULA DE MEZCLA

Tabla 3.46 Resultados de enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3		
	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)
0	44.4	43.5	----	44.4	43.7	----	44.4	43.9	----
0.5	43.7	33.6	33.5	43.6	33.1	33.4	43.6	29.9	32.8
1	41.3	28.2	30.7	41.1	28.5	31	40.9	23.8	28
1.5	38.5	26.7	29.6	38.7	27.2	29.9	37.9	22.4	26.8
2	36.6	25.9	28.6	36.6	26.5	29.1	35.5	21.8	25.9
2.5	34.8	25.5	27.8	34.8	26	28.3	33.4	21.5	25.1
3	33.3	25.5	27.9	33.3	25.5	27.6	31.6	21.4	24.5
3.5	32.1	25.1	26.9	32	25.1	26.9	30	21.3	24
4	30.9	24.3	26.1	30.8	24.9	26.7	28.8	21.1	23.5
4.5	29.9	23.9	25.5	29.8	24.3	25.8	27.7	21.1	23.2
5	28.9	23.5	25.1	29	23.9	25.3	26.8	20.9	22.9
6	27.4	22.9	24.2	27.4	23.1	24.4	25.3	20.7	22.3

TIC1 _{promedio} (°C)	TIC3 _{promedio} (°C)	TI3 _{promedio} (°C)	Desviación estándar TIC1 (σ)	Desviación estándar TIC3 (σ)	Desviación estándar TI3 (σ)
44.40	43.70		0.00	0.20	
43.63	32.20	33.23	0.06	2.01	0.38
41.10	26.83	29.90	0.20	2.63	1.65
38.37	25.43	28.77	0.42	2.64	1.71
36.23	24.73	27.87	0.64	2.56	1.72
34.33	24.33	27.07	0.81	2.47	1.72
32.73	24.13	26.67	0.98	2.37	1.88
31.37	23.83	25.93	1.18	2.19	1.67
30.17	23.43	25.43	1.18	2.04	1.70
29.13	23.10	24.83	1.24	1.74	1.42
28.23	22.77	24.43	1.24	1.63	1.33
26.70	22.23	23.63	1.21	1.33	1.16

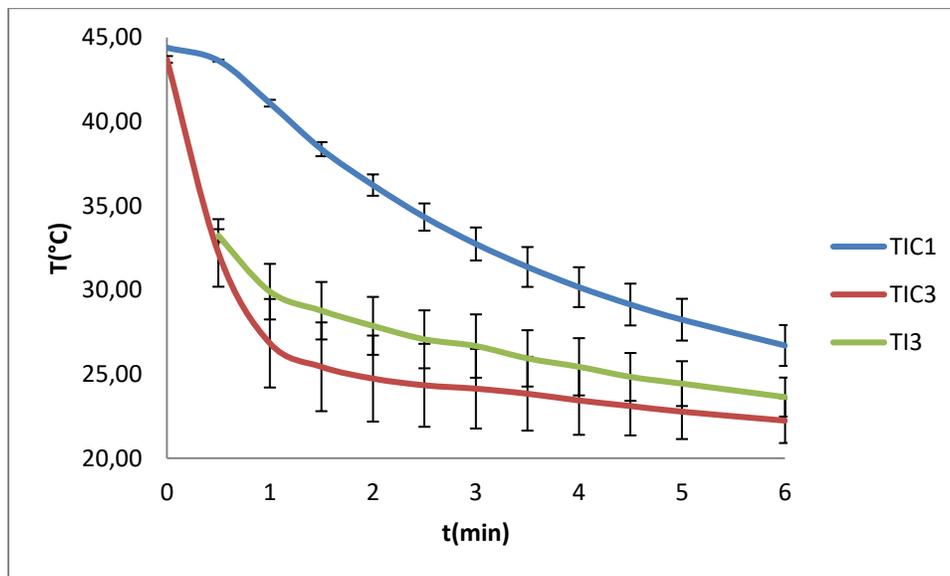


Fig. 3.24 Perfil de enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla. Fuente: Propia

Los resultados de enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla del fluido de trabajo (TIC1), indican que el proceso no tiene un comportamiento lineal, según lo expuesto en la Figura 3.24, pero es evidente un descenso pronunciado en la temperatura de este fluido. Los valores de desviación estándar de las diferentes temperaturas del perfil de TIC1 no son mayores a 1.25, por lo que las pruebas están dentro del error experimental aceptado (menor al 5%).

La transferencia de calor en esta experimentación resulta más alta que en la experimentación por camisa doble y válvula de mezcla, debido a la superficie de intercambio con la cual se tienen contacto. Para la camisa doble es de 0.05 m^2 y para el serpentín de 0.06 m^2 , lo cual es indicativo que el serpentín presenta más área de contacto y por ende la transferencia de calor resulta más rápida. Aunado a lo anterior, la conductividad térmica del material juega un papel fundamental para la transferencia de calor, siendo para la camisa doble de vidrio un valor de 1.16 W/mK y para el serpentín de acero inoxidable, 16.28 W/mK , lo cual deja en evidencia, que al ser la conductividad térmica del acero inoxidable 14 veces más alta que la del vidrio, por consecuencia se tendrá una mejor transferencia de calor.

Esta vez TIC3 y TI3 se toman como la entrada y salida del serpentín respectivamente. Ambos presentan una tendencia no lineal debido a que su control es difícil, lo cual es debido a tres situaciones que se presentan en la experimentación. La primera es por el acondicionamiento del fluido de enfriamiento, el cual es calentado hasta cierta temperatura antes de iniciar la prueba. La segunda situación, es cuando el fluido de enfriamiento que sale del serpentín, se mezcla con el fluido de enfriamiento retenido en el tanque de almacenamiento, en donde se reconfigura sin control alguno las condiciones térmicas del mismo. Y la tercera, que resulta ser la más influyente, la mezcla que se realiza en la válvula de mezcla entre el fluido de enfriamiento y el agua potable, en donde no hay ningún control de temperatura en el contacto íntimo entre ambos fluidos.

3.2.8 ENFRIAMIENTO POR SERPENTIN E INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tabla 3.47 Resultados de enfriamiento por serpiente e intercambiador de calor. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3		
	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)
0	47	29.3	35.9	47	26.2	32.9	47	23.6	31.2
0.5	45.2	30.5	35.6	43.1	27.1	32.2	43.9	24.9	30.4
1	42	31.1	34.7	40.9	27.5	32.5	40.4	25.5	29.8
1.5	40.1	31.1	34.1	38.5	27.6	30.9	37.8	25.7	29.2
2	38.5	30.9	33.4	36.6	27.6	30.3	35.8	25.9	28.8
2.5	37.1	30.7	32.9	35	27.6	29.8	34.1	25.9	28.3
3	36	30.5	32.4	33.7	27.4	29.4	32.7	25.9	28
3.5	35	30.1	31.8	32.7	27.2	29	31.6	25.8	27.6
4	34.1	29.9	31.3	31.7	27.1	28	30.6	25.7	27.2
4.5	33.4	29.6	30.9	30.9	26.8	28.2	29.8	25.5	26.9
5	32.7	29.3	30.4	30.2	26.6	27.9	29.1	25.4	26.6
6	31.6	28.7	29.7	29.1	26.2	27.2	27.9	25.1	26.1

TIC1 _{promedio} (°C)	TIC3 _{promedio} (°C)	TI3 _{promedio} (°C)	Desviación estándar TIC1 (σ)	Desviación estándar TIC3 (σ)	Desviación estándar TI3 (σ)
47.00	26.37	33.33	0.00	2.85	2.38
44.07	27.50	32.73	1.06	2.82	2.64
41.10	28.03	32.33	0.82	2.84	2.45
38.80	28.13	31.40	1.18	2.74	2.49
36.97	28.13	30.83	1.39	2.54	2.35
35.40	28.07	30.33	1.54	2.43	2.35
34.13	27.93	29.93	1.69	2.35	2.25
33.10	27.70	29.47	1.73	2.19	2.14
32.13	27.57	28.83	1.79	2.14	2.17
31.37	27.30	28.67	1.84	2.10	2.04
30.67	27.10	28.30	1.84	2.00	1.93
29.53	26.67	27.67	1.89	1.84	1.84

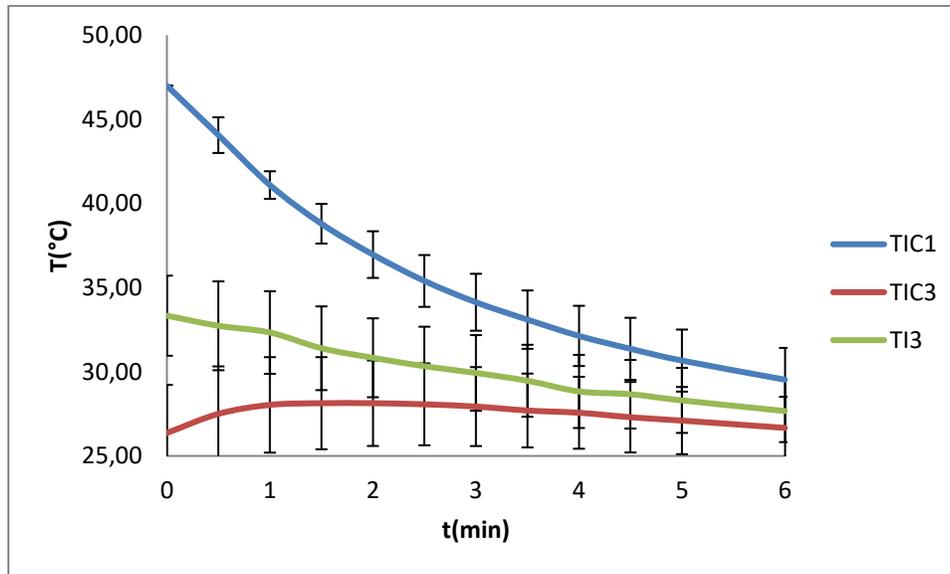


Fig. 3.25 Perfil de enfriamiento por serpentín e intercambiador. Fuente: Propia

Al igual que el enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla, el perfil de temperatura del fluido de trabajo (TIC1), mostrado en la Figura 3.25, disminuye apreciablemente sin ajustarse a un comportamiento lineal.

En esta prueba, el fluido de enfriamiento no se ajusta a una temperatura inicial, y es por ello que el perfil de TIC3 no comienza en 45°C, a diferencia del enfriamiento por serpentín y válvula de mezcla.

La temperatura del fluido de enfriamiento a la salida del intercambiador de calor (TIC3), se mantiene estable, ya que el calor ganado por el fluido de enfriamiento al pasar por el serpentín de la cuba térmica, se elimina en el intercambiador de calor, por lo tanto, permanece en cierta medida constante a lo largo de los experimentos. Los valores de desviación estándar en el perfil TIC3 llegan a valores máximos de 2.84 al inicio, y van disminuyendo conforme avanza la prueba. La dispersión de estos datos se debe a que hay variaciones en la temperatura de entrada del fluido de enfriamiento del intercambiador de calor.

En cuanto al perfil de temperatura del fluido de enfriamiento que sale del serpentín (TI3), la tendencia es que llega a un valor estable, sin embargo, a pesar de que el enfriamiento por serpentín es más rápido, su control es más difícil ya que así lo

demuestran sus valores de desviación estándar que, si bien son mayores a los identificados en el enfriamiento por la camisa doble, aún se consideran dentro del rango experimental ($< 5\%$).

De acuerdo a los resultados experimentales, se puede afirmar que el medio de enfriamiento más eficaz es cuando se utiliza el serpentín y la válvula de mezcla, ya que la tasa de transferencia de calor inicial (de 0 a 2 min) es de $4.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Para ambos procesos es (de 1 a 2 min): $4.87\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para serpentín y válvula de mezcla, y para serpentín e intercambiador resulta de $4.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Así mismo, es evidente que el fluido de trabajo (cuba térmica) alcanza una menor temperatura ($26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) cuando el proceso involucra al serpentín y la válvula de mezcla, que cuando se utiliza el serpentín y el intercambiador de calor ($29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Por último, el enfriamiento llevado a cabo por camisa doble y válvula de mezcla se realiza a una velocidad de $1.158^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en promedio, y por camisa doble e intercambiador es de $0.8229^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Comparando con el enfriamiento en serpentín, las pruebas por camisa doble resultan tener velocidades inferiores, esto es debido también a la conductividad de los materiales de construcción y al área de intercambio de calor, la cual es mayor en el serpentín.

3.3.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE CONTROL Y VARIABLES DE RESPUESTA

Las variables de control de la cuba térmica son: temperatura inicial del fluido de trabajo (interior de la cuba), la temperatura inicial del fluido de enfriamiento, temperatura de entrada del agua potable, velocidad de agitación, velocidad de flujo de los fluidos, y mezcla del fluido de enfriamiento con agua potable. Las primeras dos variables son controladas por los cables banana, conectando un extremo a la salida de cualquiera de los dos reguladores (R1 y R2) con su respectiva consigna de temperatura. Las velocidades de flujo se manipulan poniendo en marcha la bomba y regulando el flujo del agua potable. La mezcla del fluido de enfriamiento con agua potable se manipula con la válvula de regulación neumática, conectando VR1 a 20 mA para abrirla completamente, y si se requiere

abrirla parcialmente, se coloca un extremo del cable banana a la salida de cualquiera de los dos reguladores con su consigna de apertura correspondiente.

Las variables de respuesta son las temperaturas del fluido de trabajo en la cuba (TIC1), la temperatura del fluido de enfriamiento a la salida del intercambiador (TIC2), la temperatura a la entrada de la camisa doble o serpentín (TIC3), la temperatura de salida del fluido de enfriamiento del intercambiador de calor (TI2) y la temperatura de salida de la camisa doble o serpentín (TI3). A excepción de las temperaturas TI2 y TI3, que pueden determinarse usando termómetros bimetálicos portátiles, las demás variables de respuesta se pueden visualizar en los reguladores conectados en el otro extremo de los cables banana (medida).

3.2.2 MANUAL DE OPERACIÓN DE LA CUBA TÉRMICA

Materiales

7. 1 kg de sal de mesa
8. Llaves españolas de 7/8 y 19/32 pulgadas o una llave de perico
9. Termómetros bimetálicos portátiles
10. Termómetro
11. Recipiente mediano (Recomendación: bote de yogurt vacío)

PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DE UNA CUBA TÉRMICA

1. SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO

- 1.1 Verificar conexión de manguera a la tubería de aire comprimido



Fig. 3.26 Válvula de suministro de aire comprimido

- 1.2 Abrir las válvulas del compresor

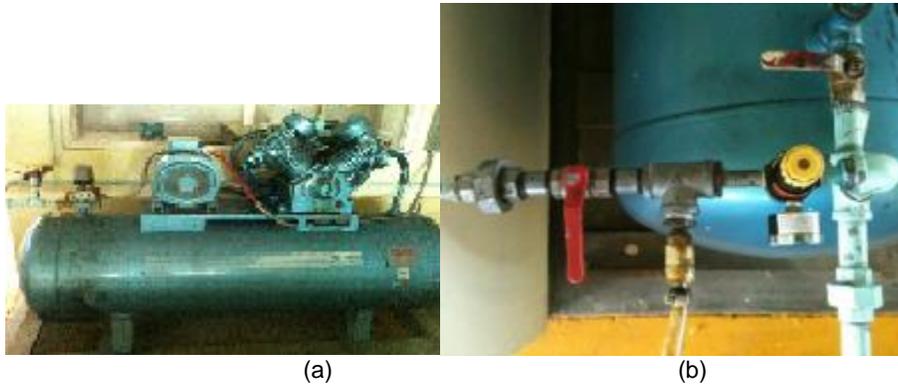


Fig. 3.27 (a) Compresor, (b) válvula de apertura del aire comprimido hacia la Planta Piloto

1.3 Abrir la válvula de la tubería que alimenta el equipo



Fig. 3.28 Válvula de control de presión de entrada del aire comprimido de la cuba térmica

2. PREPARACIÓN DEL PUESTO DE ALMACENAMIENTO

2.1 Verificar que el tanque de llenado esté limpio sin partículas.

2.2 Cerciorarse de que estén cerradas las válvulas de purga V1, V7, V8 y V10.



(a)

(b)

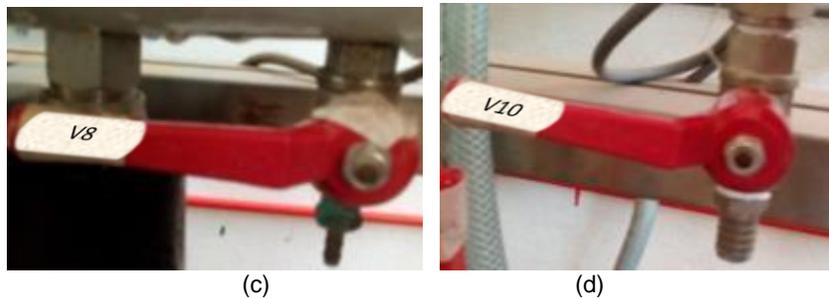


Fig. 3.29 Válvulas (a) V1, (b) V7, (c) V8 y (d) V10

2.3 Llenar el tanque de almacenamiento con 15 litros de fluido térmico (agua).



Fig. 3.30 Tanque de almacenamiento

3. PUESTA EN MARCHA DE LA UNIDAD

3.1 Conectar el equipo a la corriente eléctrica.



Fig. 3.31 Conexión de la cuba térmica a la electricidad

3.2 Poner el panel bajo tensión utilizando el conmutador rojo.



Fig. 3.32 Corte general y puesta en tensión del equipo

3.3 Presionar el botón para MARCHA GENERAL del equipo.



Fig. 3.33 Botón Marcha General

4. ENCENDIDO DE BOMBA DE CIRCULACIÓN

NOTA: Es posible que la bomba de circulación no traslade flujo, especialmente después de los acondicionamientos mencionados en cada apartado de calefacción y enfriamiento. Para tal motivo es necesario detener todo, apagar el equipo, desconectarlo y volver a conectarlo.

4.1 Abrir válvula V6 y válvula V9. La válvula V9 debe ser abierta por reglaje manual.



(a) (b)
Fig. 3.34 Válvulas (a) V6 y (b) V9

PRECAUCIÓN: La válvula V6 no debe ser totalmente abierta ya que ocasionaría un caudal alto, el cual no es recomendable para el equipo.

NOTA: Por reglaje manual entiéndase que la válvula no debe estar totalmente abierta. Se recomienda una abertura de dos vueltas.

4.2 Oprimir el botón MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN.



Fig. 3.35 Botones Marcha General y Marcha Bomba activos

5. MANUAL PARA CALEFACCIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA SUMERGIBLE

5.1 Repetir pasos del 1 y 3

5.2 Abrir válvula V3 y posteriormente abrir la válvula de la toma de agua potable, ubicada en la parte posterior del equipo.



Fig.3. 36 Válvula V3

PRECAUCIÓN: Observe y verifique el nivel de llenado ya que la cuba no debe llenarse ni brusca ni totalmente.

5.3 Una vez llena la cuba, cerrar válvula V3 y válvula de agua potable, oprimir el botón MARCHA AGITACIÓN CUBA y colocar el agitador en 250 rpm con su controlador.

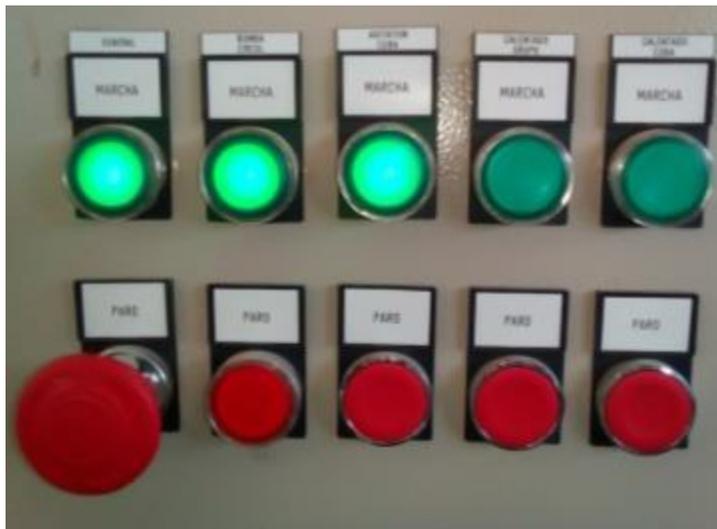


Fig. 3.37 Botones Marcha General, Marcha Bomba y Marcha Agitación Cuba activos



Fig. 3.38 Agitador de la cuba de vidrio

NOTA: La agitación no se mantiene constante, es posible que oscile de 248 rpm a 253 rpm

5.4 Configuración de los reguladores

5.4.1 Es necesario colocar el regulador R1 en Manual y establecerle una consigna del 100%.



Fig. 3.39 Regulador 1 (a) Modo Manual (b) enviando consigna (abajo) y recibiendo medida (arriba)

5.4.2 Las conexiones con los cables banana se efectúan de la siguiente manera:

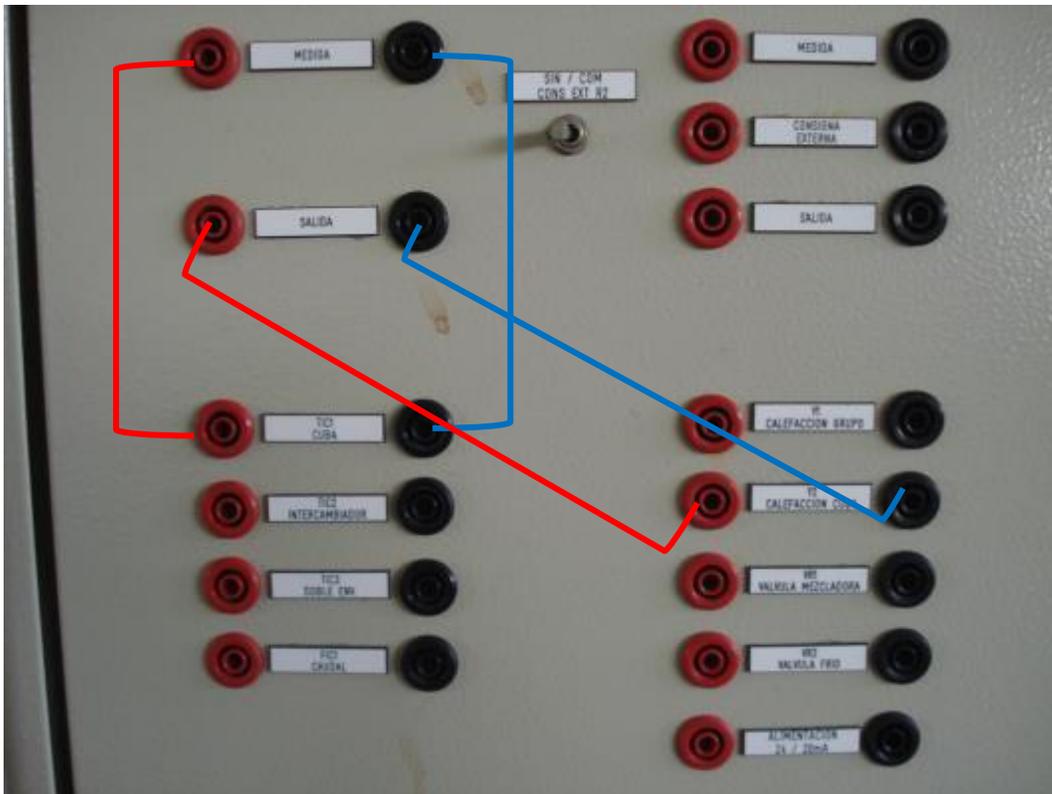


Fig. 3.40 Puenteo en tablero con cables banana

5.5 Posteriormente oprimir el botón MARCHA CALENTADOR CUBA

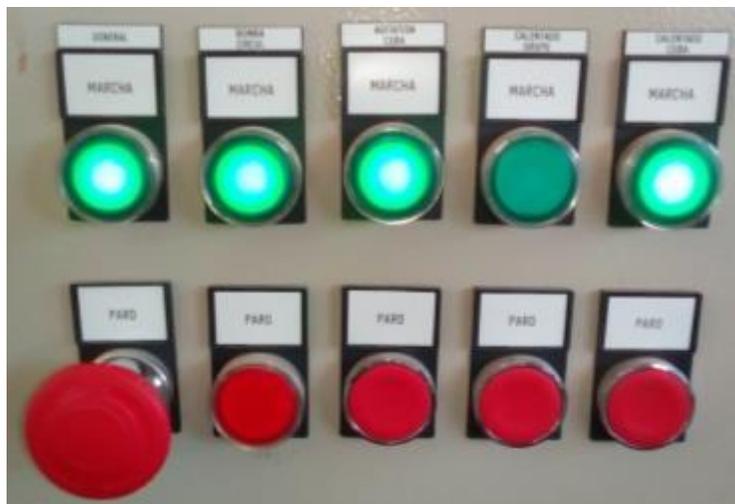


Fig. 3.41 Botones Marcha General, Marcha Bomba, Marcha Agitación Cuba y Marcha Calentador Cuba activos

6. MANUAL PARA CALEFACCIÓN POR CIRCULACIÓN EXTERNA

NOTA: Es importante hacer la medición de la temperatura ambiente del agua potable poco antes de comenzar.

6.1 Repetir pasos 1, 3.1 y 3.2

6.2 Se debe colocar la siguiente configuración en el panel con los cables banana:

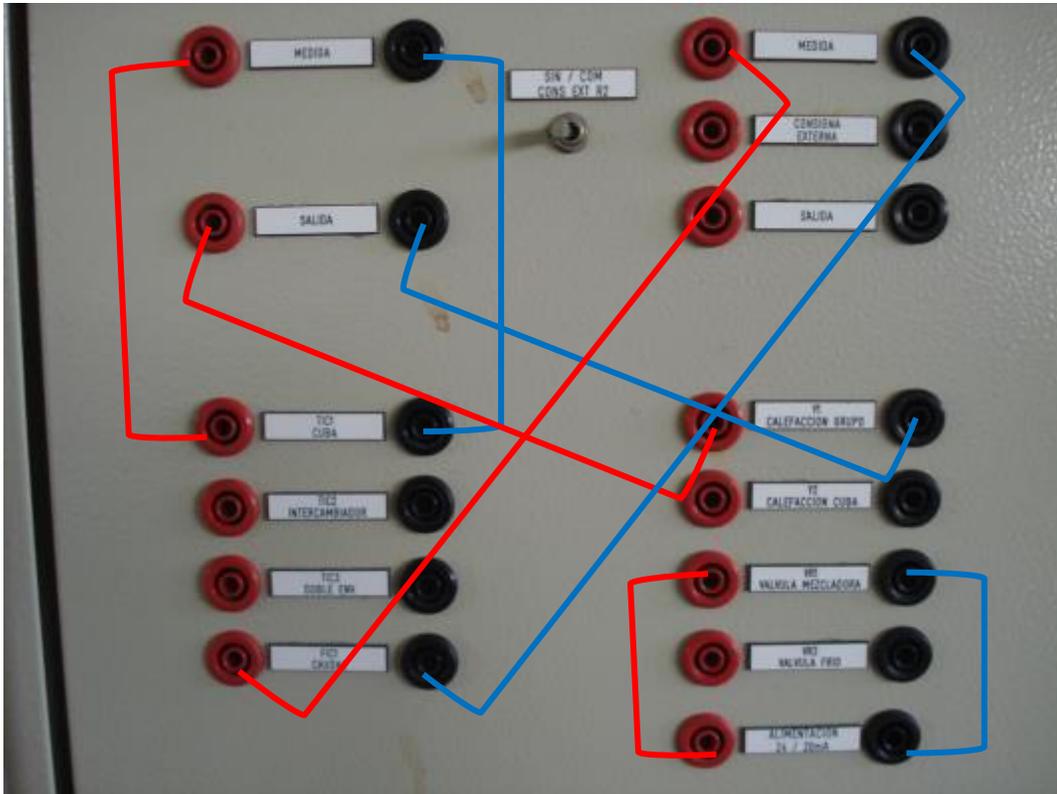


Fig. 3.42 Puenteo en tablero con cables banana, previo al estudio

Y el regulador R1 se debe poner en MANUAL con una consigna de 100 y el regulador R2 también se debe colocar en MANUAL.



Fig. 3.43 Reguladores 1 y 2 con consigna deseada y Modo recomendado

6.3 Posteriormente se debe abrir la válvula V3, e inmediatamente la válvula de alimentación de agua potable, checar que la cuba se llene y cerrar ambas inmediatamente, cerrando primero la válvula del agua potable y luego V3.

PRECAUCIÓN: Observe y verifique el nivel de llenado ya que la cuba no debe llenarse ni brusca ni totalmente.

6.4 Abrir Válvula V13 totalmente.



Fig. 3.44 Válvula V13

6.5 Cuando todo esté listo para comenzar el estudio, se debe abrir válvula V2 pero no totalmente, es decir con un ángulo de entre 60 y 70°.

6.6 Oprimir botón MARCHA GENERAL, luego el botón MARCHA AGITADOR CUBA, encender el agitador y colocarlo con la perilla en 250 rpm, oprimir botón MARCHA BOMBA, y finalmente oprimir botón MARCHA CALEFACCIÓN GRUPO

NOTA: Es posible que no haya recirculación, debido a que puede existir presencia de aire en las tuberías. En este caso, es necesario abrir V2 y V7. En caso de que salga líquido, cerrar inmediatamente V7 y continuar.



Fig. 3.45 Botones Marcha General, Marcha Bomba, Marcha Agitación Cuba y Marcha Calentador Cuba activos



(a) (b)
Fig. 3.46 Válvulas (a) V2 y (b) V7

NOTA: Si es la última prueba en realizarse, se deberá purgar el equipo por medio de las válvulas V10 (purga de la camisa doble), V8 (purga resistencia eléctrica externa), V7 (purga del tanque de almacenamiento) y V1 (purga de la cuba de vidrio) usando el recipiente mediano.

7. MANUAL PARA CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE

7.1 Antes de comenzar se sugiere lo siguiente;

7.1.1 Repetir pasos del 1 al 3 y luego abrir válvula V6 no totalmente, y válvula V9 totalmente.

7.1.2 Puentear con los cables banana como sigue, colocar regulador 1 (R1) en modo AUTO y dar una consigna (recomendada) de 47°C:

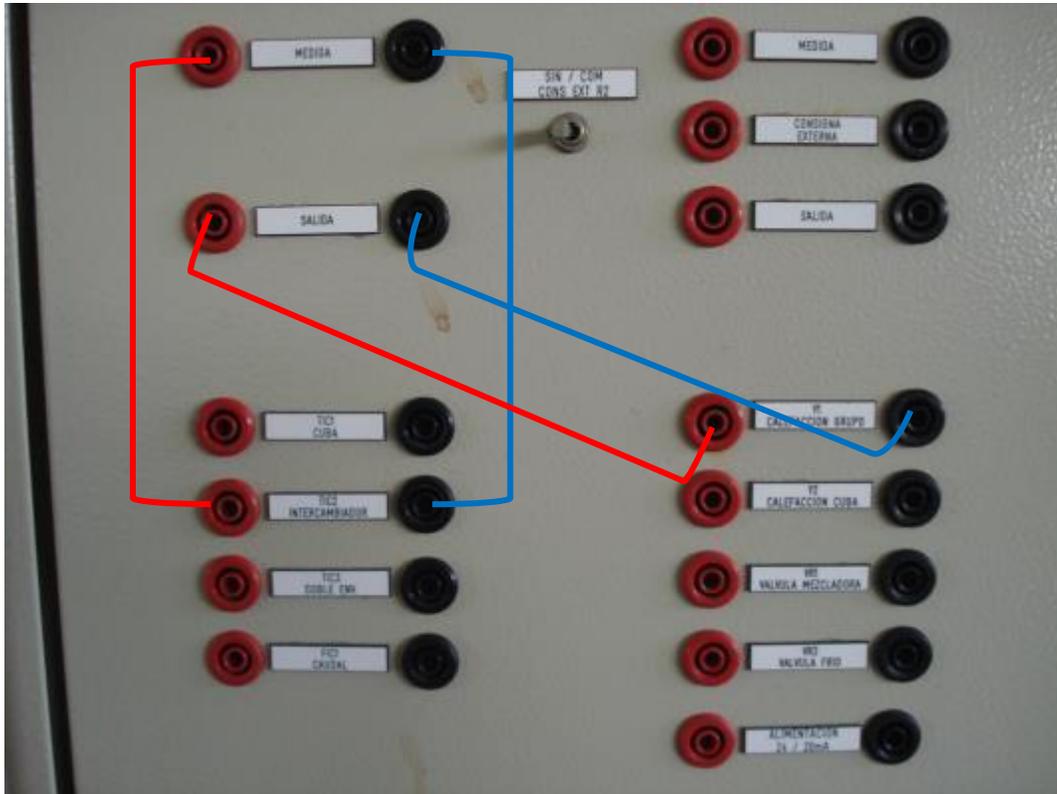


Fig. 3.47 Puenteo en tablero con cables banana, previo al estudio



Fig. 3.48 Regulador 1 mostrando consigna recomendada

7.1.3 Repetir pasos 3.3 y 4.2 y esperar a que la MEDIDA y la SALIDA sean iguales en R1. Una vez iguales, detener la bomba y la marcha general con los botones de PARO correspondientes.

7.2 Mantener abierta válvula V6 de modo que el flujo oscile entre 50 y 55 %

7.3 Abrir válvula V9 por reglaje manual (se recomienda abrir solo dos vueltas de la misma)

7.4 Abrir válvula V11 totalmente.



Fig. 3.49 Válvula V11

7.5 Colocar el termómetro bimetálico a la salida de la doble capa de vidrio, justo atrás del tanque de almacenamiento.



Fig. 3.50 Termómetro bimetálico portátil a la salida de la camisa doble

NOTA: Es importante hacer la medición de la temperatura ambiente del agua potable antes de comenzar.

7.6 Puentear de nuevo con los cables banana de la siguiente manera:

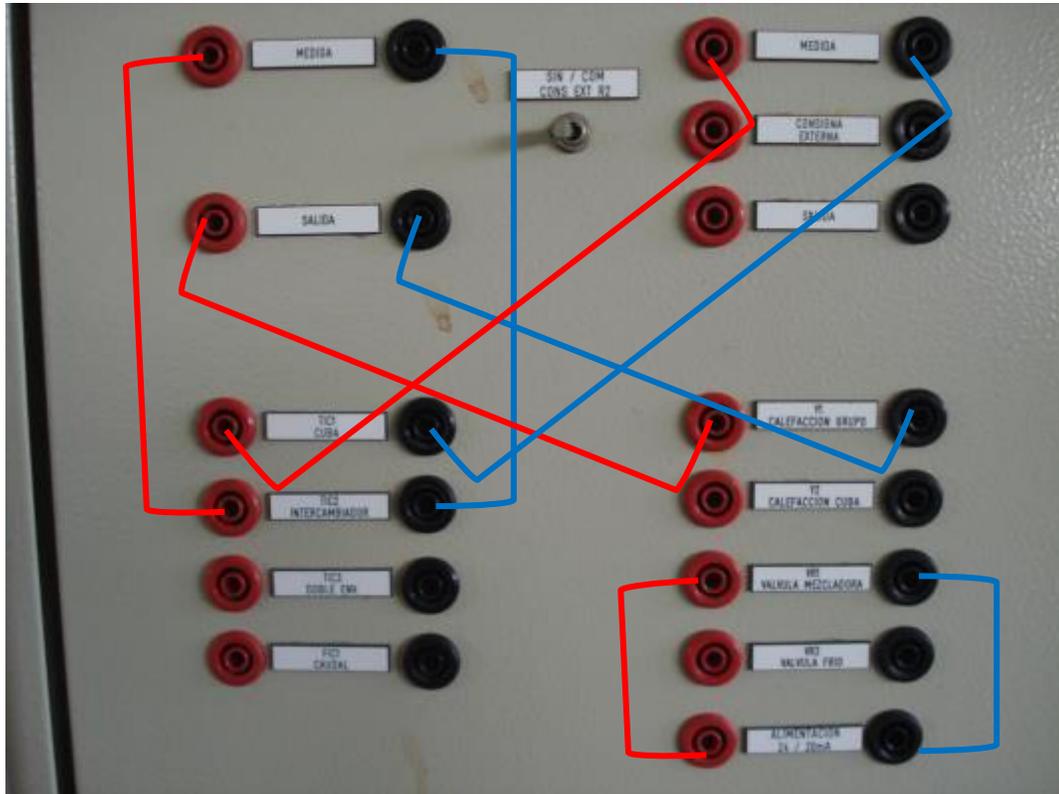


Fig. 3.51 Puenteo en tablero con cables banana, para el estudio

Además, se debe colocar R1 en modo AUTO ($P=0.8$, $I=60$, $D=10$) con consigna de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$

7.7 Justo cuando se pretenda comenzar, abrir válvula de agua potable y válvula V3 para el llenado de la cuba. Cuando esté llena la cuba cerrar ambas válvulas.



Fig. 3.52 Servicio de agua potable

PRECAUCIÓN: Observe y verifique el nivel de llenado ya que la cuba no debe llenarse ni brusca ni totalmente.

7.8 Oprimir el botón MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN



Fig. 3.53 Botones Marcha General y Marcha Bomba activos

7.9 Posteriormente oprimir el botón de MARCHA AGITACIÓN CUBA, encender el agitador con el botón ubicado en el mismo y fijarlo a una velocidad de 250 rpm, e inmediatamente oprimir el botón de MARCHA CALENTADOR GRUPO.

NOTA: Si esta prueba es la última en hacerse, se debe purgar los medidores de flujo, haciendo girar el tapón que se encuentra debajo de los mismos, con las llaves mencionadas en **MATERIALES**, con precaución debido a que cuando se abre, se derrama al instante todo el líquido contenido en dichos medidores.

Aunado a lo anterior, se deberá purgar el equipo por medio de las válvulas V10 (purga de la camisa doble), V8 (purga resistencia eléctrica externa), V7 (purga del tanque de almacenamiento) y V1 (purga de la cuba de vidrio) usando el recipiente mediano.



Fig. 3.54 Tapón, ubicado debajo de los medidores de flujo

8. MANUAL PARA CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN

8.1 Antes de comenzar se sugiere lo siguiente;

8.1.1 Repetir pasos del 1 al 3 y luego abrir válvula V6 no totalmente, y válvula V9 totalmente

8.1.2 Puentear con los cables banana como sigue, colocar Regulador 1 (R1) en modo AUTO y dar una consigna (recomendada) de 47°C:

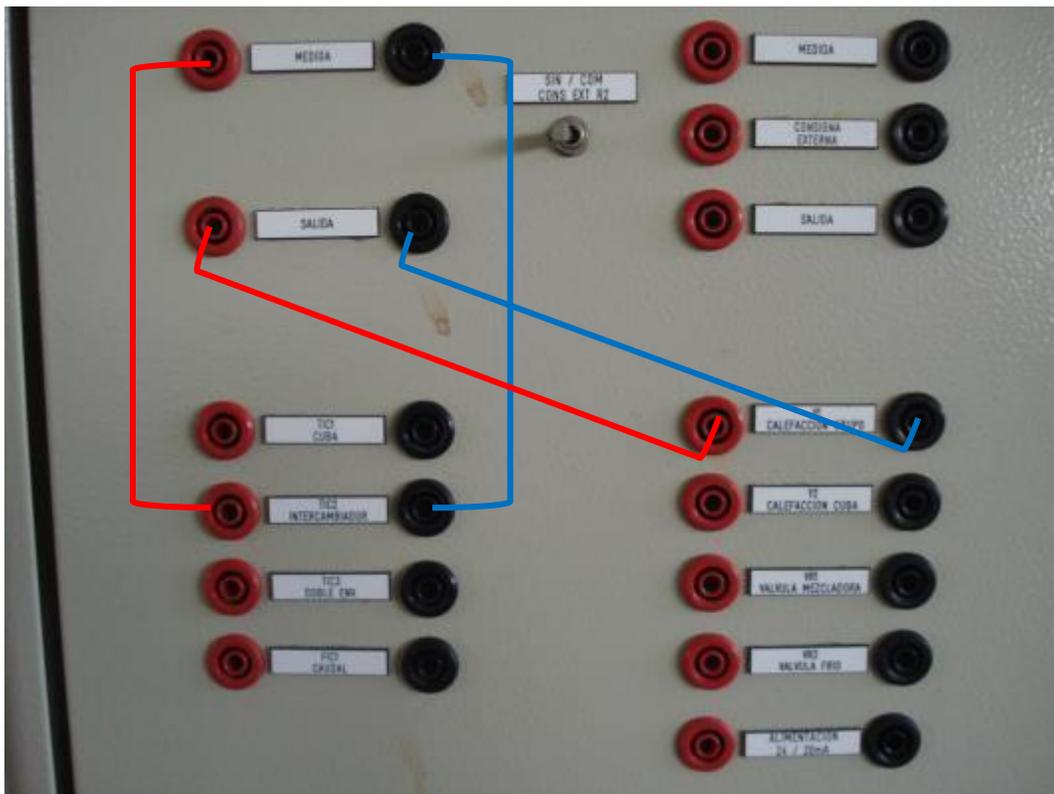


Fig. 3.55 Puenteo en tablero con cables banana, previo al estudio



Fig. 3.56 Regulador 1 mostrando consigna recomendada

8.1.3 Repetir paso 3.3 y 4.2 y esperar a que la MEDIDA y la SALIDA sean iguales en R1. Una vez iguales, detener sólo la bomba y la marcha general con los botones de PARO correspondientes.

8.2 Mantener abierta válvula V6 de modo que el flujo oscile entre 50 y 55%

8.3 Abrir válvula V9 por reglaje manual (se recomienda abrir solo dos vueltas de la misma)

8.4 Abrir válvula V12 totalmente.



Fig. 3.57 Válvula V12

8.5 Colocar el termómetro bimetalico a la salida del serpentín interno, justo atrás del tanque de almacenamiento.



Fig. 3.58 Termómetro bimetálico portátil a la salida del serpentín interno

NOTA: Es importante hacer la medición de la temperatura ambiente del agua potable antes de comenzar

8.6 Puentear con los cables banana de la siguiente manera:

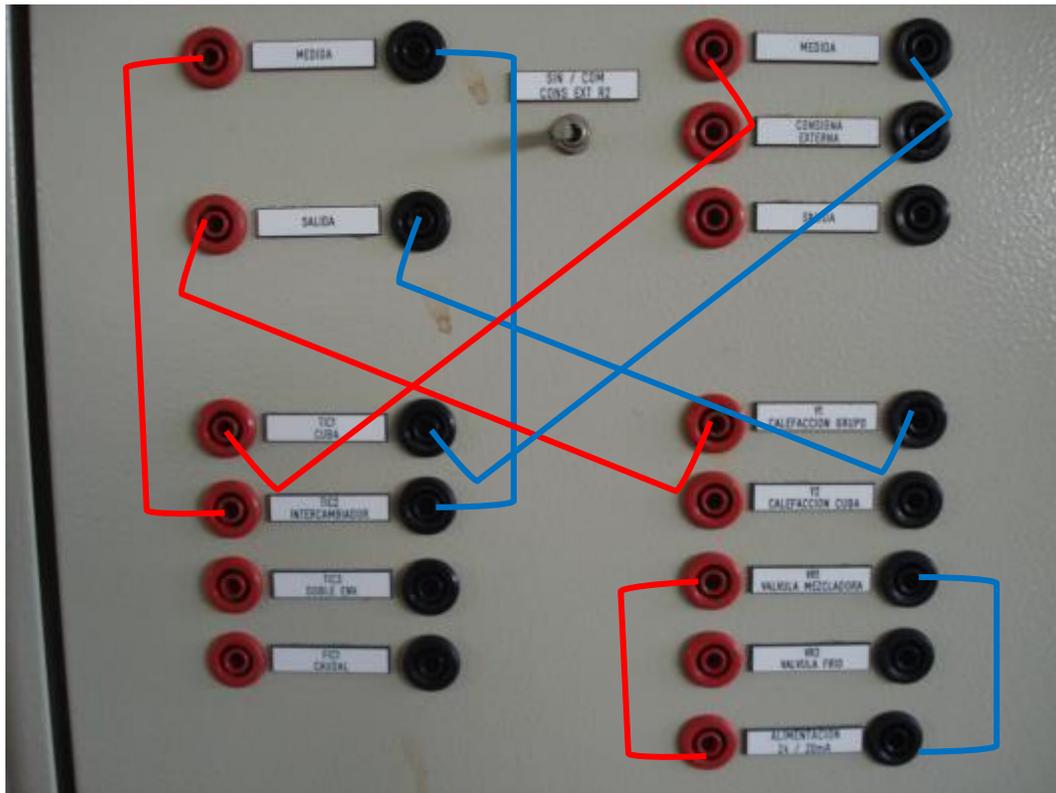


Fig. 3.59 Puenteo en tablero con cables banana, justo para comenzar el estudio

Además, se debe colocar R1 en modo AUTO con consigna de 45°C

8.7 Justo cuando se pretenda comenzar, abrir válvula de agua potable y válvula V3 para el llenado de la cuba. Cuando esté llena la cuba cerrar ambas válvulas.



Fig. 3. 60 Servicio de agua potable

PRECAUCIÓN: Observe y verifique el nivel de llenado ya que la cuba no debe llenarse ni brusca ni totalmente.

8.8 Oprimir el botón MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN



Fig. 3.61 Botones Marcha General y Marcha Bomba activos

8.9 Posteriormente oprimir el botón de MARCHA AGITACIÓN CUBA, encender el agitador con el botón ubicado en el mismo y fijarlo a una velocidad de 250 rpm, e inmediatamente oprimir el botón de MARCHA CALENTADOR GRUPO.

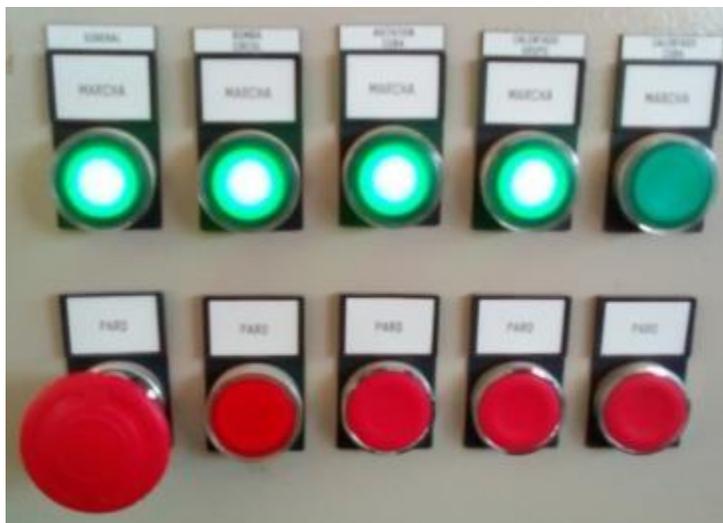


Fig. 3.62 Botones Marcha General, Marcha Bomba, Marcha Agitación Cuba y Marcha Calentador Grupo activos

NOTA: Si esta prueba es la última en hacerse, se debe purgar los medidores de flujo, haciendo girar el tapón que se encuentra debajo de los mismos, con las llaves mencionadas en MATERIALES, con precaución debido a que cuando se abre, se derrama al instante todo el líquido contenido en dichos medidores. Aunado a lo anterior, se deberá purgar el equipo por medio de las válvulas V10 (purga de la camisa doble), V8 (purga resistencia eléctrica externa), V7 (purga del tanque de almacenamiento) y V1 (purga de la cuba de vidrio) usando el recipiente mediano.

9. MANUAL PARA ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE Y VÁLVULA DE MEZCLA

9.1 Antes de comenzar con la operación de enfriamiento, es necesario realizar lo siguiente:

9.1.1 Repetir pasos 1, 2, 3.1 y 3.2 Se debe configurar el panel con los cables banana de la siguiente manera:

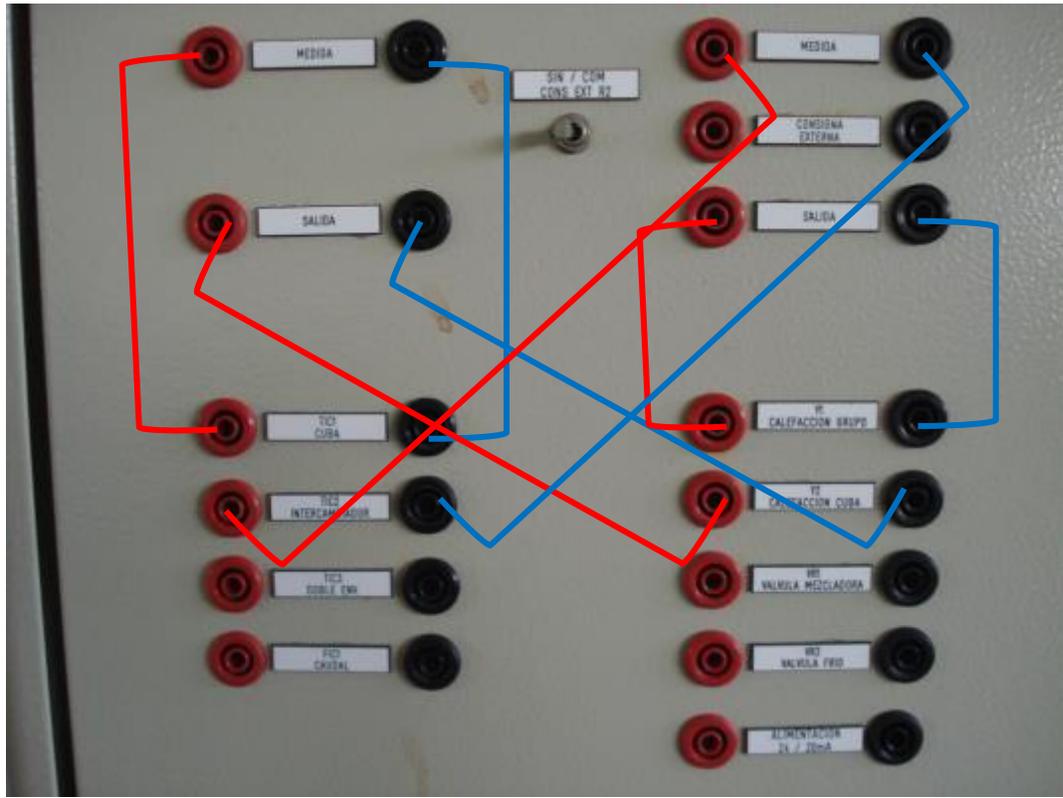


Fig. 3.63 Puenteo en tablero con cables banana, previo al estudio

Ambos reguladores R1 y R2 deberán colocarse en modo AUTO con una consigna de 45°C.

9.1.2 Llenar la cuba usando la válvula de alimentación de agua potable y la válvula V3, una vez realizado el llenado, cerrarlas y abrir parcialmente V6 y totalmente V9.

PRECAUCIÓN: Observe y verifique el nivel de llenado ya que la cuba no debe llenarse ni brusca ni totalmente.



(a)



(b)

Fig. 3.64 Válvula (a) V6 y (b) V9

9.1.3 Oprimir los botones en la siguiente secuencia:

- MARCHA GENERAL
- MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN
- MARCHA CALEFACCIÓN GRUPO
- MARCHA AGITACIÓN CUBA (Encender el agitador y colocar con la perilla en 250 rpm).
- MARCHA CALEFACCIÓN CUBA



Fig. 3.65 Botones de Marcha activos

9.1.4 Esperar a que la MEDIDA y la SALIDA sean iguales en R1 y R2. Una vez igualados, detener cada marcha con los botones de PARO correspondientes.

NOTA: Es importante hacer la medición de la temperatura ambiente del agua potable antes de continuar.

9.2 Reconfigurar el puenteo de la siguiente manera:

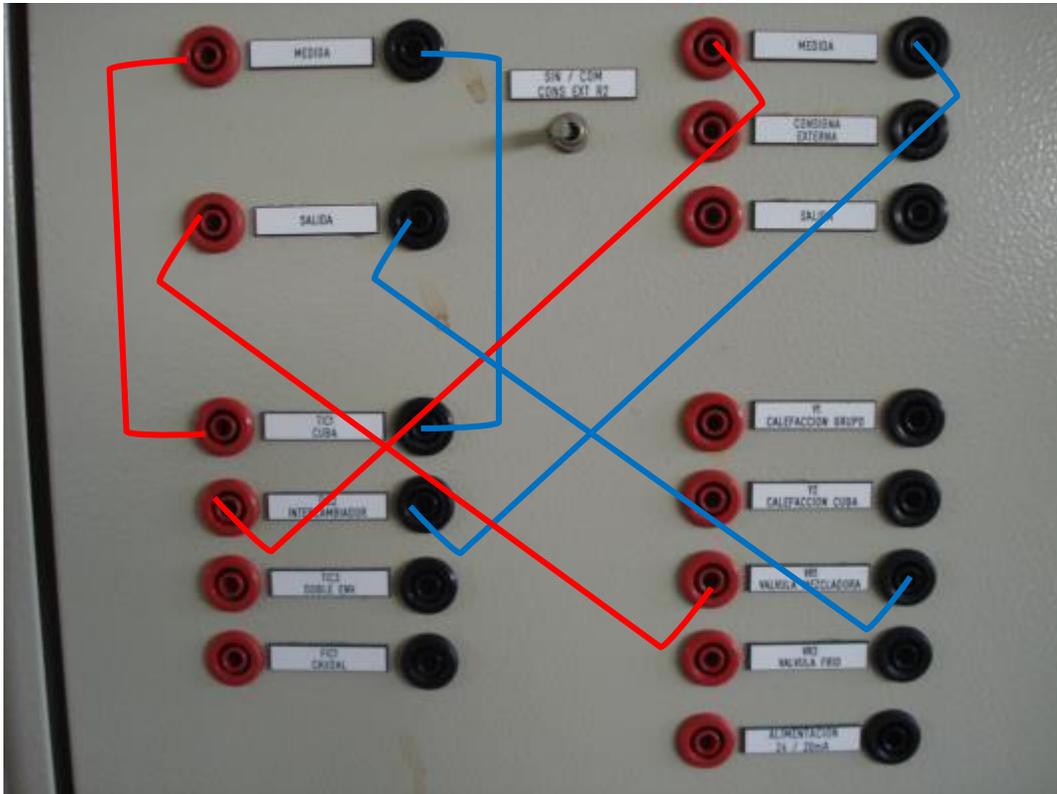


Fig. 3.66 Punteo en tablero con cables banana, para dar inicio al estudio

Ambos reguladores deberán colocarse modo MANUAL, colocando en R1 una consigna de 50 y R2 se deja en 0.



Fig. 3.67 Reguladores 1 y 2 con consigna deseada y Modo recomendado

9.3 Abrir válvula V4, válvula V9 por reglaje manual (se recomiendan sólo dos vueltas), las válvulas V11 y V14.

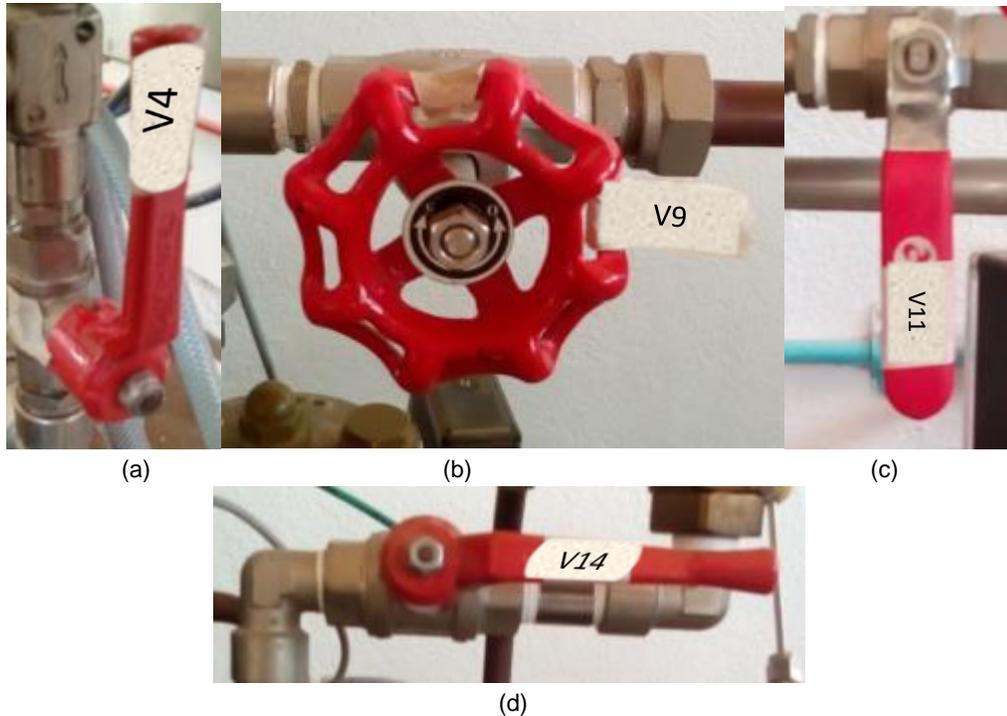


Fig. 3.68 Válvulas (a) V4, (b) V9, (c) V11 y (d) V14

9.4 Oprimir botón de MARCHA GENERAL, luego el de MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN, y finalmente el de MARCHA AGITACIÓN CUBA (Encender el agitador y colocar con la perilla en 250 rpm).

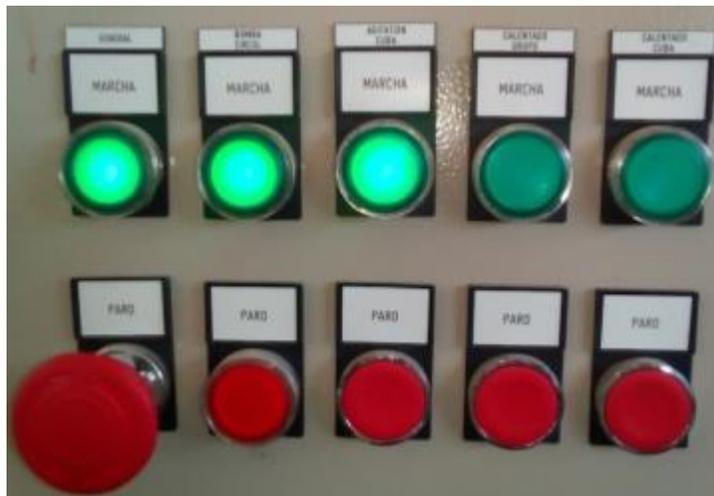


Fig. 3.69 Botones Marcha General, Marcha Bomba y Marcha Agitación Cuba activos

9.5 Rápidamente se abre la válvula del agua potable, de modo que el medidor de flujo marque 200 l/h



Fig. 3.70 Medidor de flujo

NOTA: Si esta prueba es la última en hacerse, se debe purgar los medidores de flujo, haciendo girar el tapón que se encuentra debajo de los mismos, con las llaves mencionadas en **MATERIALES**, con precaución debido a que cuando se abre, se derrama al instante todo el líquido contenido en dichos medidores. Aunado a lo anterior, se deberá purgar el equipo por medio de las válvulas V10 (purga de la camisa doble), V8 (purga resistencia eléctrica externa), V7 (purga del tanque de almacenamiento) y V1 (purga de la cuba de vidrio) usando el recipiente mediano.

10. MANUAL PARA ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR DE CALOR

10.1 Antes de comenzar con la operación de enfriamiento, es necesario realizar lo siguiente:

10.1.1 Verificar la temperatura del agua potable

10.1.2 Repetir pasos 1, 2, 3.1 y 3.2 Se debe configurar el panel con los cables banana de la siguiente manera:

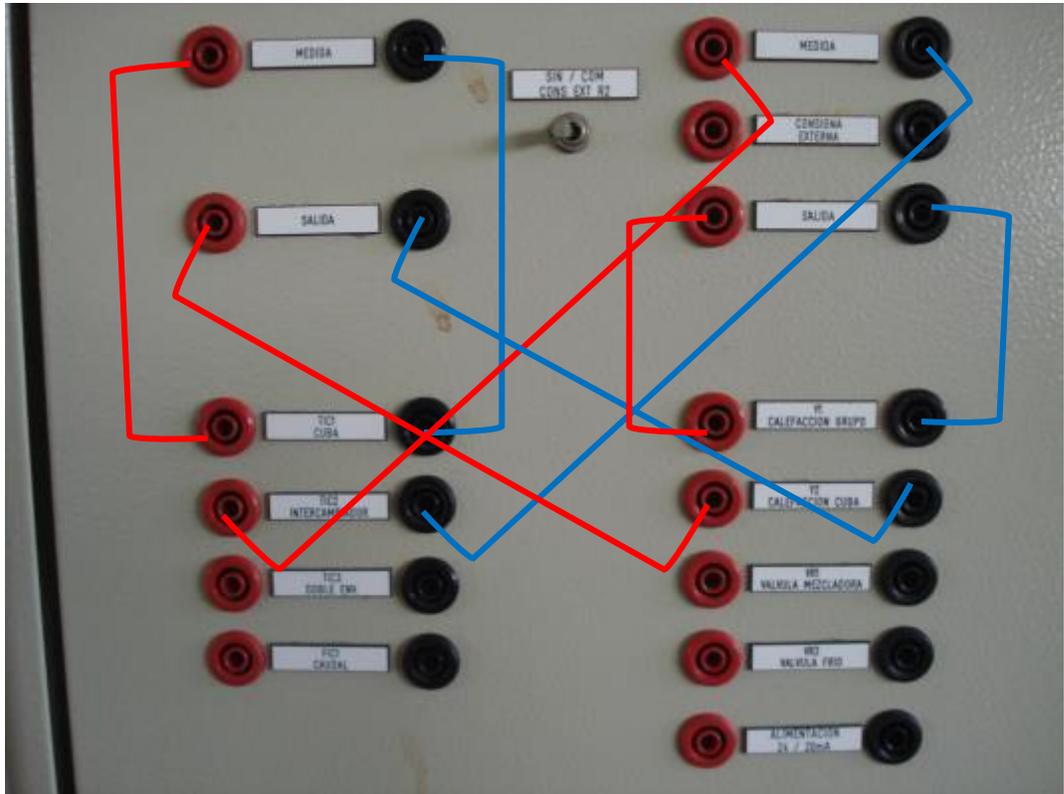


Fig. 3.71 Puenteo en tablero con cables banana, previo al estudio

Ambos reguladores R1 y R2 deberán colocarse en modo AUTO con una consigna de 46°C para R1 y una consigna acorde a la temperatura del agua potable, si está en el rango de 9-11°C una consigna de 30°C, si está en el rango de 17-19°C, una consigna de 25°C. Esto con el fin de agilizar el estudio.

10.1.3 Llenar la cuba usando la válvula de alimentación de agua potable y la válvula V3; una vez llena, cerrar dichas válvulas y abrir la válvula V6 parcialmente y la válvula V9 totalmente.

10.1.4 Oprimir los botones en la siguiente secuencia:

- MARCHA GENERAL
- MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN
- MARCHA CALEFACCIÓN GRUPO
- MARCHA AGITACIÓN CUBA (Encender el agitador y colocar con la perilla en 250 rpm).
- MARCHA CALEFACCIÓN CUBA

10.1.5 Esperar a que la MEDIDA y la SALIDA sean iguales en R1 y R2. Una vez igualados, detener cada marcha con los botones de PARO correspondientes.

NOTA: Es importante hacer la medición de la temperatura ambiente del agua potable antes de continuar.

10.2 Reconfigurar el puenteo de la siguiente manera:

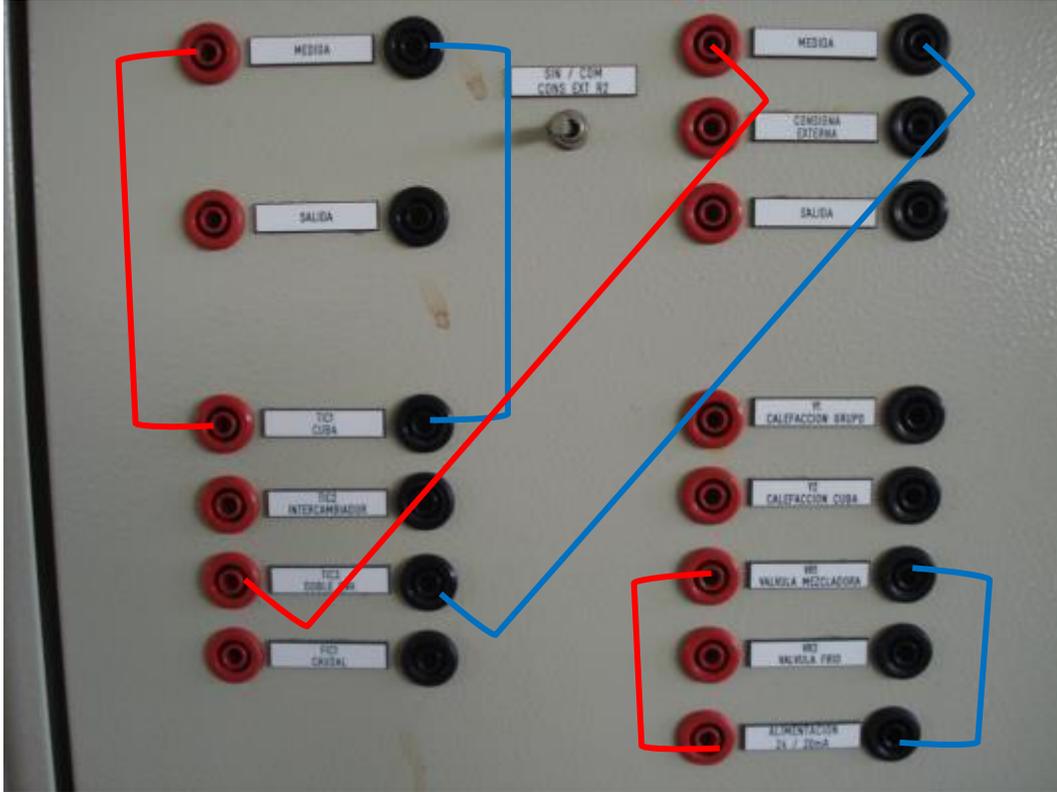


Fig. 3.72 Puenteo en tablero con cables banana, para dar inicio al estudio

Ambos reguladores deberán colocarse modo MANUAL, sin consigna alguna

10.3 Abrir las válvulas V4, V5 y V9 por reglaje manual (se recomienda dos vueltas), y abrir totalmente la válvula V11.

10.4 Oprimir botón de MARCHA GENERAL, luego el de MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN, y finalmente el de MARCHA AGITACIÓN CUBA (Encender el agitador y colocar con la perilla en 250 rpm).

10.5 Rápidamente se abre la válvula del agua potable, de modo que el medidor de flujo marque 200 l/h

NOTA: Si esta prueba es la última en hacerse, se debe purgar los medidores de flujo, haciendo girar el tapón que se encuentra debajo de los mismos, con las llaves mencionadas en **MATERIALES**, con precaución debido a que cuando se abre, se derrama al instante todo el líquido contenido en dichos medidores.

11. MANUAL PARA ENFRIAMIENTO POR SERPETIN Y VÁLVULA DE MEZCLA

NOTA: Es imprescindible cerciorarse que no haya aire en las líneas, para ello observar en el transmisor de caudal que no haya burbujas. En caso de tener, durante la secuencia del experimento abrir la válvula V10 hasta que salga un flujo continuo de agua y cerrar.

11.1 Antes de comenzar con la operación de enfriamiento, es necesario realizar lo siguiente:

11.1.1 Repetir pasos 1, 2, 3.1 y 3.2 Se debe configurar el panel con los cables banana de la siguiente manera:

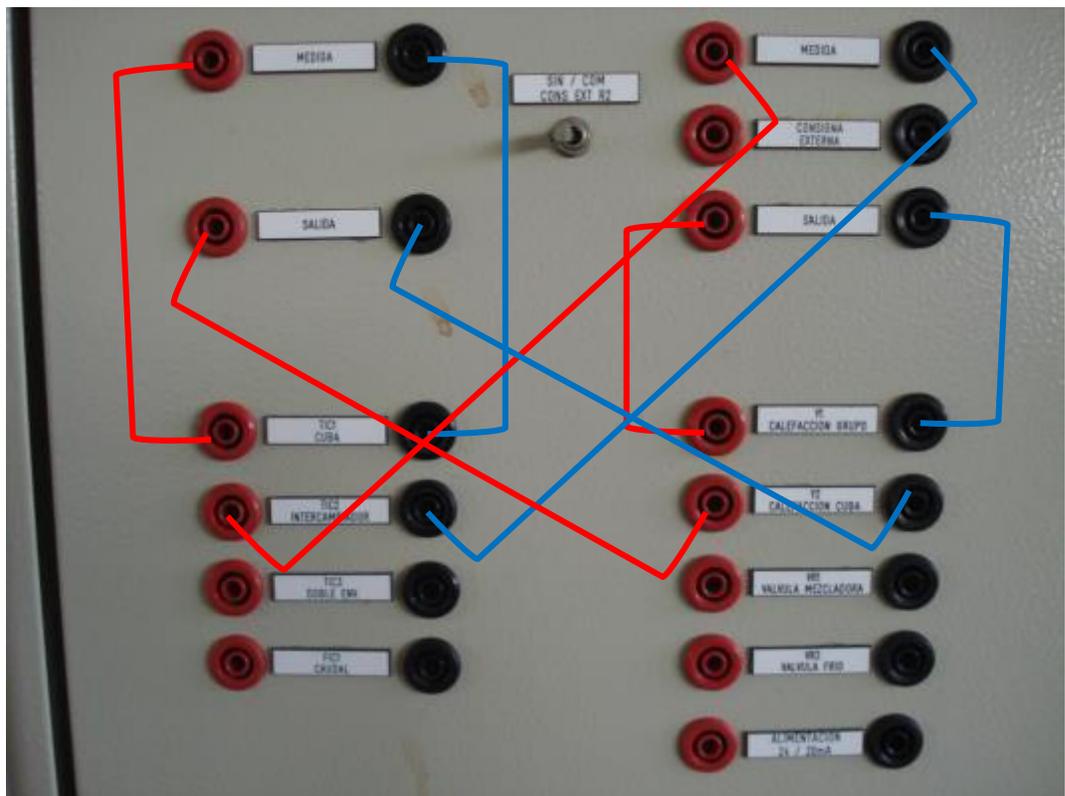


Fig. 3.73 Puenteo en tablero con cables banana, previo al estudio

Ambos reguladores R1 y R2 deberán colocarse en modo AUTO con una consigna de 47°C y 46°C respectivamente.



Fig. 3.74 Reguladores 1 y 2 con consigna deseada y Modo recomendado

11.1.2 Llenar la cuba con la válvula de alimentación del agua potable y la válvula V3; una vez llena, abrir la válvula V6 parcialmente y la válvula V9 totalmente y cerrar la válvula de agua potable y V3.

PRECAUCIÓN: Observe y verifique el nivel de llenado ya que la cuba no debe llenarse ni brusca ni totalmente.

11.1.3 Oprimir los botones en la siguiente secuencia:

- MARCHA GENERAL
- MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN
- MARCHA CALEFACCIÓN GRUPO
- MARCHA AGITACIÓN CUBA (Encender el agitador y colocar con la perilla en 250 rpm).
- MARCHA CALEFACCIÓN CUBA



Fig. 3.75 Botones de Marcha activos

11.1.4 Esperar a que la MEDIDA y la SALIDA sean iguales en R1 y R2. Una vez igualados, detener cada marcha con los botones de PARO correspondientes.

NOTA: Es importante hacer la medición de la temperatura ambiente del agua potable antes de continuar.

11.2 Reconfigurar el puenteo de la siguiente manera:

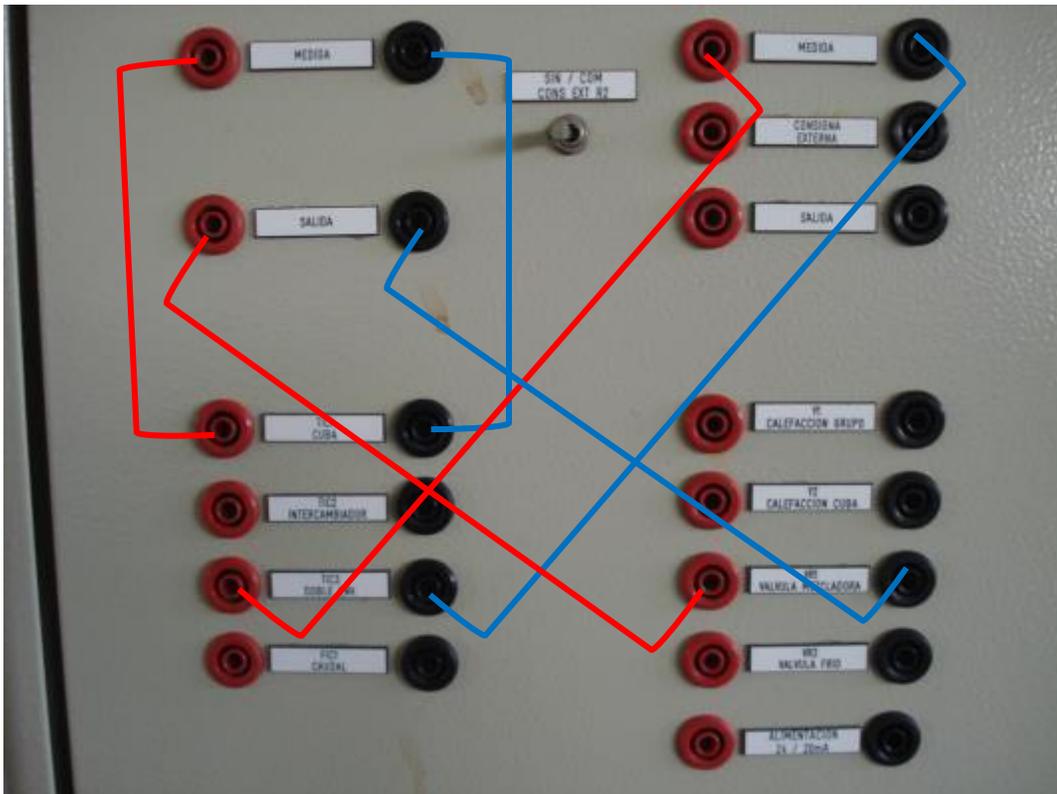


Fig. 3.76 Puenteo en tablero con cables banana, para dar inicio al estudio

Ambos reguladores deberán colocarse modo MANUAL, colocando en R1 una consigna de 50 y R2 se deja en 0.



Fig. 3.77 Reguladores 1 y 2 con consigna deseada y Modo recomendado

11.3 Abrir válvula V4, válvula V9 por reglaje manual (se recomiendan sólo dos vueltas), También abrir las válvulas V12 y V14.

11.4 Oprimir botón de MARCHA GENERAL, luego el de MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN, y finalmente el de MARCHA AGITACIÓN CUBA (encender el agitador y colocar con la perilla en 250 rpm).

11.5 Rápidamente, abrir la válvula de alimentación de agua potable, de modo que el medidor de flujo indique 200 l/h.

NOTA: Si esta prueba es la última en hacerse, se debe purgar los medidores de flujo, haciendo girar el tapón que se encuentra debajo de los mismos, con las llaves mencionadas en **MATERIALES**, con precaución debido a que cuando se abre, se derrama al instante todo el líquido contenido en dichos medidores. Aunado a lo anterior, se deberá purgar el equipo por medio de las válvulas V10 (purga de la camisa doble), V8 (purga resistencia eléctrica externa), V7 (purga del tanque de almacenamiento) y V1 (purga de la cuba de vidrio) usando el recipiente mediano.

12. MANUAL PARA ENFRIAMIENTO POR SERPETÍN E INTERCAMBIADOR DE CALOR

12.1 Antes de comenzar con la operación de enfriamiento, es necesario realizar lo siguiente:

12.1.1 Verificar la temperatura del agua potable

12.1.2 Repetir pasos 1, 2, 3.1 y 3.2 Se debe configurar el panel con los cables banana de la siguiente manera:

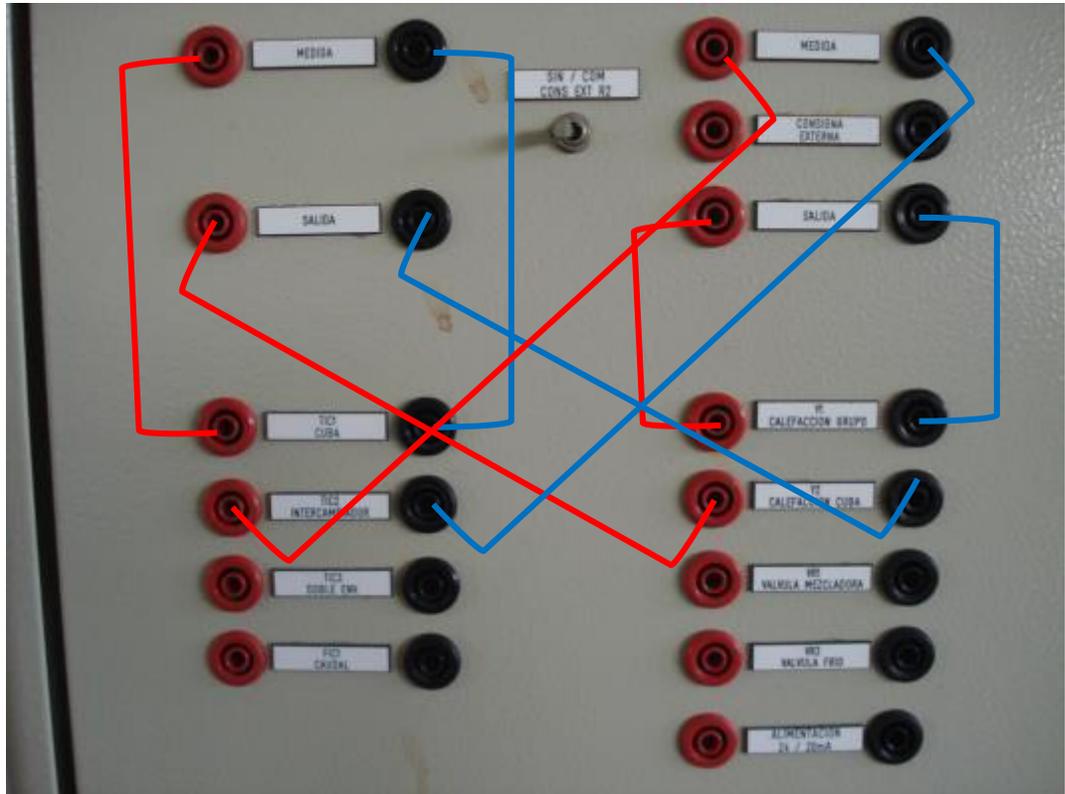


Fig. 3.78 Punteo en tablero con cables banana, previo al estudio

Ambos reguladores R1 y R2 deberán colocarse en modo AUTO con una consigna de 48°C para R1 y una consigna acorde a la temperatura del agua potable, si es muy fría una consigna de 30°C, si está en el rango de 17-19°C, una consigna de 25°C. Esto es con el fin de agilizar el estudio.

12.1.3 Llenar la cuba usando la válvula de alimentación de agua potable y la válvula V3, una vez realizado el llenado, cerrarlas. Abrir válvula V6 no completamente y la V9 totalmente.

PRECAUCIÓN: Observe y verifique el nivel de llenado ya que la cuba no debe llenarse ni brusca ni totalmente.

12.1.4 Oprimir los botones en la siguiente secuencia:

- MARCHA GENERAL
- MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN
- MARCHA CALEFACCIÓN GRUPO
- MARCHA AGITACIÓN CUBA (Encender el agitador y colocar con la perilla en 250 rpm).
- MARCHA CALEFACCIÓN CUBA

12.1.5 Esperar a que la MEDIDA y la SALIDA sean iguales en R1 y R2. Una vez igualados, detener cada marcha con los botones de PARO correspondientes.

NOTA: Es importante hacer la medición de la temperatura ambiente del agua potable antes de continuar.

12.2 Reconfigurar el puenteo de la siguiente manera:

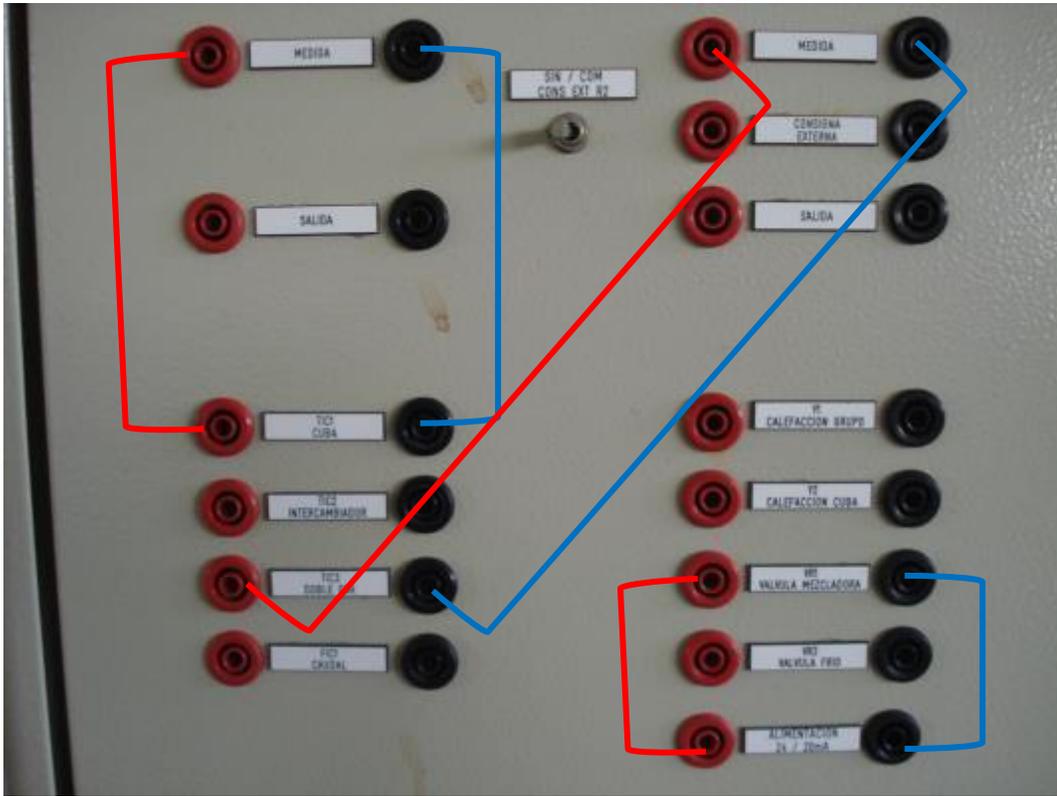


Fig. 3.79 Puenteo en tablero con cables banana, para dar inicio al estudio

Ambos reguladores deberán colocarse modo MANUAL, sin consigna alguna

12.3 Abrir las válvulas V4, V5 y V12. Abrir la válvula V9 por reglaje manual (solo dos vueltas)

12.4 Oprimir botón de MARCHA GENERAL, luego el de MARCHA BOMBA DE CIRCULACIÓN, y finalmente el de MARCHA AGITACIÓN CUBA (Encender el agitador y colocar con la perilla en 250 rpm).

12.5 Rápidamente se abre la válvula del agua potable, de modo que el medidor de caudal marque 200 l/h

NOTA: Si esta prueba es la última en hacerse, se debe purgar los medidores de flujo, haciendo girar el tapón que se encuentra debajo de los mismos, con las

llaves mencionadas en **MATERIALES**, con precaución debido a que cuando se abre, se derrama al instante todo el líquido contenido en dichos medidores. Aunado a lo anterior, se deberá purgar el equipo por medio de las válvulas V10 (purga de la camisa doble), V8 (purga resistencia eléctrica externa), V7 (purga del tanque de almacenamiento) y V1 (purga de la cuba de vidrio) usando el recipiente mediano.

3.2.3 PROPUESTA DE PRÁCTICA

La práctica que se propone en el siguiente trabajo consta de dos estudios de calentamiento y dos estudios de enfriamiento. Los estudios de calentamiento se realizaron con la camisa doble y el serpentín interno; en contraste, los estudios de enfriamiento se realizaron en la camisa doble y el intercambiador de calor y el serpentín e intercambiador de calor. El fluido de trabajo fue una solución acuosa de cloruro de sodio al 5% en peso.

Esta experimentación se llevó a cabo con el fin de comparar la efectividad de la salmuera como fluido de calentamiento o enfriamiento, tanto en camisa doble como en serpentín.

3.2.4 SOLUCIÓN ACUOSA DE NaCl al 5%

1. CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE

Seguir los pasos expuestos en el punto 7 del Manual de Operación.

1.1 En el punto 7.1.2, se debe revisar, según las condiciones térmicas en las que se encuentre el laboratorio, la consigna ideal, pero se recomienda entre 46-48°C

2. CALEFACCIÓN POR SERPENTIN INTERNO

Se debe realizar el procedimiento descrito en el punto 8 del Manual de Operación.

2.1 En el punto 8.1.2, se debe revisar, según las condiciones térmicas en las que se encuentre el laboratorio, la consigna ideal, pero se recomienda entre 46-48°C.

3. ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR

Debe seguirse los pasos expuestos en el punto 10 del Manual de Operación.

3.1 En el punto 10.1.2, se debe revisar, según las condiciones térmicas en las que se encuentre el laboratorio, la consigna ideal, pero se recomienda entre 46-48°C.

4. ENFRIAMIENTO POR SERPETÍN E INTERCAMBIADOR.

Esta experimentación se lleva a cabo con el procedimiento mostrado en el punto 12 del Manual de Operación

4.1 En el punto 12.1.2, se debe revisar, según las condiciones térmicas en las que se encuentre el laboratorio, la consigna ideal, pero se recomienda entre 46-48°C.

3.3 RESULTADOS DE LA PRÁCTICA PROPUESTA

3.3.1 CALEFACCIÓN POR CAMISA DOBLE

Esta experimentación se llevó a cabo introduciendo el fluido a calentar desde el suministro de agua potable hasta el interior de la cuba. Por otro lado, el fluido de calentamiento, salmuera de NaCl al 5% en masa, se colocó en el tanque de almacenamiento para transportarse hacia la resistencia calefactora de grupo, y posteriormente a la camisa doble. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas.

Tabla 3.48 Resultados de calefacción por camisa doble, salmuera al 5%. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3		
	TIC1(°C)	TIC2 (°C)	TI3(°C)	TIC1(°C)	TIC2 (°C)	TI3(°C)	TIC1(°C)	TIC2 (°C)	TI3(°C)
0	20.5	45.1	44.1	20.5	45.8	43.6	20.5	45	39.8
0.5	21.4	45.2	44.2	21.4	45.5	44.1	21.1	44.7	42.6
1	22.3	45.1	44.3	22.3	45.2	44.2	22	45	43.6
1.5	23.1	45.1	44.3	23.1	45	44.1	22.8	45.1	44.1
2	24	45.1	44.3	24	45	44.2	23.7	45.1	44.3
2.5	24.8	45	44.4	24.8	44.9	44.2	24.5	45.1	44.3
3	25.6	45	44.4	25.5	45	44.3	25.3	45.1	44.4
3.5	26.3	45.1	44.4	26.3	45.1	44.4	26.1	45.1	44.4
4	27	45	44.4	27	45	44.4	26.8	45	44.4
4.5	27.7	45	44.6	27.7	45	44.5	27.5	45.1	44.5
5	28.3	45.1	44.5	28.4	45.1	44.6	28.2	45.1	44.5
5.5	29	45	44.6	29	45.1	44.6	28.8	45	44.6
6	29.6	45	44.6	29.6	45	44.6	29.5	45.1	44.6
6.5	30.2	45.1	44.7	30.2	45.1	44.7	30	45.1	44.6
7	30.7	45.1	44.7	30.8	45	44.7	30.6	45	44.7
7.5	31.3	45.1	44.8	31.3	45.1	44.8	31.1	45.1	44.7
8	31.8	45.1	44.7	31.8	45.1	44.7	31.7	45.1	44.7
8.5	32.3	45	44.8	32.3	45	44.8	32.2	45	44.8
9	32.7	45.1	44.8	32.8	45.1	44.8	32.7	45.1	44.8
9.5	33.2	45	44.8	33.3	45	44.8	33.2	45.1	44.8
10	33.6	45	44.9	33.7	45.1	44.9	33.6	45	44.9
Promedio	27.88	45.06	44.54	27.90	45.10	44.48	27.71	45.05	44.20

TIC1 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TIC1})	TIC2 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TIC2})	TIC3 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TIC3})
20.50	0	45.30	0.4359	42.50	2.352
21.30	0.1732	45.13	0.4041	43.63	0.896
22.20	0.1732	45.10	0.1000	44.03	0.379
23.00	0.1732	45.07	0.0577	44.17	0.115
23.90	0.1732	45.07	0.0577	44.27	0.058
24.70	0.1732	45.00	0.1000	44.30	0.100
25.47	0.1528	45.03	0.0577	44.37	0.058
26.23	0.1155	45.10	0	44.40	0.000
26.93	0.1155	45.00	0	44.40	0.000
27.63	0.1155	45.03	0.0577	44.53	0.058
28.30	0.1000	45.10	0.0000	44.53	0.058
28.93	0.1155	45.03	0.0577	44.60	0
29.57	0.0577	45.03	0.0577	44.60	0
30.13	0.1155	45.10	0	44.67	0.058
30.70	0.1000	45.03	0.0577	44.70	0.000
31.23	0.1155	45.10	0	44.77	0.058
31.77	0.0577	45.10	0	44.70	0
32.27	0.0577	45.00	0	44.80	0
32.73	0.0577	45.10	0	44.80	0
33.23	0.0577	45.03	0.0577	44.80	0
33.63	0.0577	45.03	0.0577	44.90	0

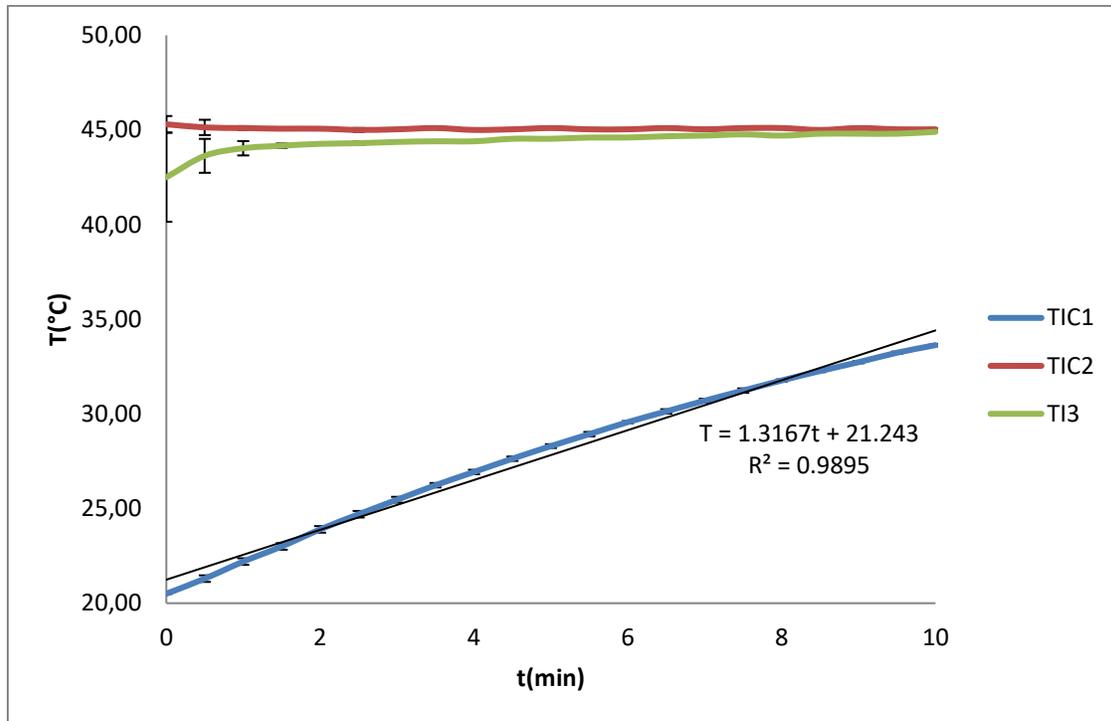


Fig. 3.80 Perfil de calefacción por camisa doble con fluido térmico de salmuera al 5% (promedio). Fuente: Propia

Al analizar la Tabla 3.48, se observa que la temperatura del fluido térmico (TIC2), en este caso salmuera, mantiene similitud entre las tres pruebas realizadas. Esto es debido a que la temperatura es regulada por la resistencia calefactora del grupo, la cual tiene una consigna establecida de 45°C, siendo esta la temperatura de acondicionamiento del fluido térmico el tiempo en que se lleva a cabo cada prueba y por ende el perfil mostrado en la Figura 3.80 es una línea constante.

En cuanto al fluido de trabajo, en este caso, agua potable, presenta una velocidad de calentamiento a una tasa constante durante los 10 minutos que duró esta experimentación, siendo el valor un promedio de 1.3167 °C/min.

Para determinar las propiedades de la salmuera, fluido transportado por la camisa doble, se calculó la temperatura promedio de cada prueba, las cuales están en la Tabla 3.49.

Tabla 3.49 Promedios TIC2+TI3 para revisión de las propiedades del fluido térmico (salmuera al 5%). Fuente: Propia

	<i>Prueba 1</i>	<i>Prueba 2</i>	<i>Prueba 3</i>
	TIC2 + TI3 promedio (°C)	TIC2 + TI3 promedio (°C)	Pm TIC2 + TI3 promedio (°C)
	44.6	44.7	42.4
	44.7	44.8	43.65
	44.7	44.7	44.3
	44.7	44.55	44.6
	44.7	44.6	44.7
	44.7	44.55	44.7
	44.7	44.65	44.75
	44.75	44.75	44.75
	44.7	44.7	44.7
	44.8	44.75	44.8
	44.8	44.85	44.8
	44.8	44.85	44.8
	44.8	44.8	44.85
	44.9	44.9	44.85
	44.9	44.85	44.85
	44.95	44.95	44.9
	44.9	44.9	44.9
	44.9	44.9	44.9
	44.95	44.95	44.95
	44.9	44.9	44.95
	44.95	45	44.95
Promedio	44.8	44.8	44.6

Con el objetivo de profundizar aún más en el comportamiento de la calefacción por camisa doble, utilizando la salmuera como fluido de calefacción, se presentan a continuación, mediante un procedimiento detallado, el cálculo de los coeficientes individuales de calor de la cuba agitada y la camisa doble así como el coeficiente global de transferencia de calor.

CUBA AGITADA (AGUA)

$$\frac{h_{cuba} D_j}{k} = a \left(\frac{L^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{c \mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_\omega} \right)^{0.14} \dots (6)$$

(Kern, 1992).

Dónde:

L=Longitud de la paleta del agitador

N=Número de revoluciones por hora del agitador

ρ= Densidad promedio del fluido

c= Capacidad calorífica del fluido

k= Conductividad térmica del fluido

μ=Viscosidad del fluido

D_j=Diámetro interno del recipiente

Los valores de *a* dependen del tipo de medio calefactor y del agitador empleado.

Debido a que el fluido es agua, la expresión $\left(\frac{\mu}{\mu_\omega}\right)^{0.14}$ es 1.

Tabla 3.50 Elección del valor de *a*. Fuente: Propia

AGITADOR	SUPERFICIE	<i>a</i>
Turbina	Chaqueta	0.62
Turbina	Serpentín	1.5
Paletas	Chaqueta	0.36
Paletas	Serpentín	0.87
Ancla	Chaqueta	0.54
Propela	Chaqueta	0.54
Propela	Serpentín	0.83

$$\frac{h_{cuba} D_j}{k} = 0.36 \left(\frac{L^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{c \mu}{k} \right)^{1/3} \dots (7)$$

Por consiguiente, se presentan los datos de propiedades referentes al fluido frío (agua), con base en su temperatura promedio.

Tabla 3.51A Propiedades del fluido de trabajo

CAMISA DOBLE (SALMUERA AL 5%)

Para los cálculos en camisa doble, es necesario emular el ánulo de un intercambiador de tubos concéntricos. A continuación, se muestran datos de temperatura promedio para obtener las propiedades de la salmuera, así como el flujo y la longitud de la camisa doble:

Tabla 3.53 Datos de temperatura, flujo y longitud de la camisa doble. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Pm TIC2- TI3 (°C)	44.80	44.79	44.62
% de flujo	57	57	56.5
Flujo total (L/h)	720		
W (L/h)	410.4	410.4	406.8
W (kg/h)	410.4	410.4	406.8
L camisa doble(m)	0.23		

El cálculo del área de flujo y del diámetro equivalente se muestra a continuación:

Tabla 3.54B Cálculo del área de flujo y diámetro equivalente. Fuente: Propia

Área de flujo	
D₁(m)	0.21
D₂(m)	0.23
a_a(m²)	0.006911
D_e(m)	0.04190

D₁= Diámetro externo de la cuba
 D₂= Diámetro interno de la camisa doble
 $a_a = \text{Área del ánulo } a_a = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4} \dots (8)$
 $D_e = \text{Diámetro equivalente } D_e = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1} \dots (9)$
 (Kern, 1992).

Posteriormente, calcular el gasto másico por metro cuadrado, estimar las propiedades de la salmuera a la temperatura promedio, y los números adimensionales de Reynolds, Prandtl y Nusselt.

Tabla 3.55B Gasto másico, propiedades de la salmuera y números adimensionales. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
TIC1 Pm(°C)	27.88	27.90	27.71
μ (kg/ms)	0.0008392	0.0008389	0.0008422
c (J/kg°C)	4177.9	4177.8	4178
k (W/m°C)	0.6159	0.6159	0.6156
ρ (kg/m³)	995.6	995.6	995.6

(Holman, 1998)

Para averiguar la longitud de la paleta del agitador es necesario conocer cuál es el tipo. (Ver Anexo II)

Hélice de 3 palas	
Dj/L	3

Tabla 3.52A Longitud de la paleta. Fuente: Propia

Dj (m)	Diámetro interno del recipiente	0.2
N (rph)	Número de rph	15060
L (m)	Longitud de la paleta	0.0666

Sustituyendo los valores en la ecuación 7, se obtienen los siguientes coeficientes individuales del lado de la cuba agitada.

h_{cuba} (J/sm²°C)	130.16	130.14	130.27
--	--------	--------	--------

$$h_{cuba \text{ promedio}} = 130.19 \frac{J}{sm^2°C}$$

Desv est	0.07086
----------	---------

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
G_a (kg/sm²)	16.49	16.49	16.34
μ (kg/ms)	0.0006749	0.0006749	0.0006779
c (J/kg°C)	3955	3955	3954
k (W/m°C)	0.6300	0.6300	0.6298
Re	1024	1024	1010
D_e/L	0.1821		
Pr	4.236	4.2367	4.257
RePr D_e/L	790.4	790.4	783.8
Nu_d	17.19	17.19	17.14

(Kern, 1992)

El coeficiente individual se obtiene despejando Nusselt de la ecuación 14, la cual se eligió debido a que el flujo es laminar y por ende, la transferencia de calor se realiza por la conductividad térmica y se cumple que $RePr D_e/L > 10$ (Mijeev, 1979)

$$h_{camisa \text{ doble}} = \frac{Nu_d * k}{D_e} \quad (14)$$

(Holman, 1998)

h_{camisa doble} (J/sm²°C)	258.58	258.58	257.75
--	--------	--------	--------

$$h_{camisa \text{ doble promedio}} = 258.309 \frac{J}{sm^2°C}$$

Desv est	0.4809
----------	--------

Una vez obtenidos los coeficientes individuales de transferencia de calor de ambos lados (cuba agitada y camisa doble), se procede a obtener el valor del coeficiente global de transferencia de calor, utilizando los datos de la camisa doble facilitados por el fabricante:

Tabla 3.56 Datos de la camisa doble de área de intercambio, conductividad térmica de material y espesor de la camisa doble

DATOS DE LA CAMISA DOBLE	
A (m ²)	0.05
k _{vidrio} (W/m°C)	1.16
espesor (m)	0.005

Los datos presentados en la Tabla 3.53 junto con los coeficientes individuales obtenidos, se sustituyen en la ecuación (15), para el cálculo del inverso del coeficiente global:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{cuba}} + \frac{espesor}{k_{vidrio}} + \frac{1}{h_{camisa\ doble}} \quad \text{--- (15)}$$

Tabla 3.57 Resultados coeficiente global de transferencia de calor. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1/U (s m ² C/J)	0.01586	0.01586	0.01586
U (J/s*m ² C)	63.05	63.04	63.02

Una vez obtenido este valor, se continúa obteniendo el recíproco, el cual será sustituido en la ecuación (16). Los valores están reportados en la Tabla 3.54.

$$Q = U * A * \Delta T \quad \text{--- (16)}$$

(Incropera, 2007)

$$\Delta T = (T_{fluido\ camisa\ doble}(t) - T_{masa\ cuba\ agitada}(t)) \quad \text{--- (17)}$$

(Mijeev, 1979)

Dónde:

$$T_{fluido\ camisa\ doble}(t) = TIC1$$

$$T_{masa\ cuba\ agitada}(t) = \text{Promedio TIC2+TI3}$$

Tabla 3.58 Resultados del cálculo del calor transferido. Fuente: Propia

t(min)	Q Prueba 1 (W)	Q Prueba 2 (W)	Q Prueba 3 (W)	Q promedio(W)	Desviación estándar (σ_Q)
0	75.98	76.29	69.02	73.76	4.111
0.5	73.45	73.77	71.06	72.76	1.478
1	70.62	70.61	70.28	70.50	0.196
1.5	68.09	67.62	68.70	68.14	0.542
2	65.26	64.94	66.18	65.46	0.644
2.5	62.74	62.26	63.66	62.88	0.711
3	60.21	60.37	61.29	60.63	0.585
3.5	58.16	58.16	58.77	58.37	0.353
4	55.80	55.80	56.41	56.00	0.353
4.5	53.91	53.75	54.52	54.06	0.407
5	52.02	51.86	52.31	52.06	0.232
5.5	49.81	49.96	50.42	50.07	0.318
6	47.92	47.92	48.37	48.07	0.264
6.5	46.34	46.34	46.80	46.49	0.264
7	44.77	44.29	44.91	44.65	0.323
7.5	43.03	43.03	43.49	43.18	0.265
8	41.30	41.30	41.60	41.40	0.174
8.5	39.72	39.72	40.02	39.82	0.174
9	38.62	38.30	38.60	38.51	0.179
9.5	36.88	36.57	37.03	36.83	0.236
10	35.78	35.62	35.77	35.72	0.089

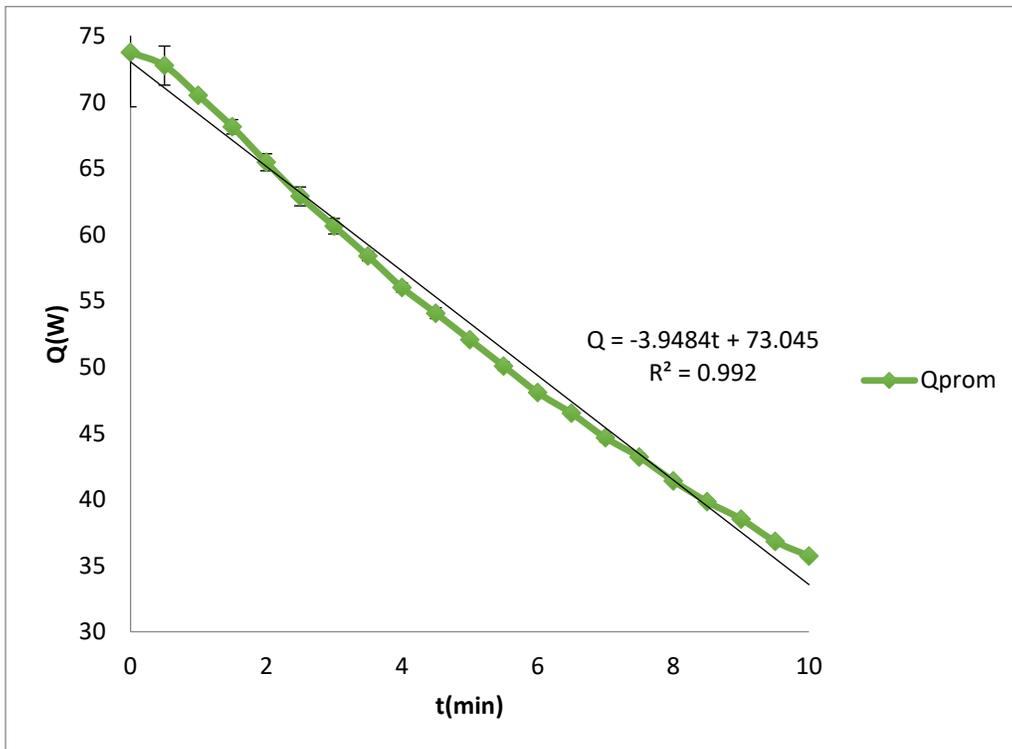


Fig. 3.81 Perfil Q-t de la calefacción por camisa doble con fluido térmico de salmuera al 5% (promedio).
Fuente: Propia

El perfil de calor (Q) vs tiempo (t), se calculó debido a que la transferencia de calor se realiza en estado transitorio, involucrando al tiempo, como se puede observar en la Figura 3.8. El perfil arrojado indicaba una tasa de cambio de transferencia de calor constante a lo largo de la experimentación.

Es de hacerse notar que la desviación estándar presenta un bajo valor (menor al 5%) debido al control que se tiene en el fluido de calefacción.

3.3.2 ENFRIAMIENTO POR CAMISA DOBLE E INTERCAMBIADOR

El enfriamiento por camisa doble e intercambiador se realizó usando como fluido de enfriamiento salmuera de NaCl al 5%, el cual fluye desde el tanque de almacenamiento hacia la bomba y después cruza el intercambiador, donde es enfriado con agua potable, y posteriormente fluye a la camisa doble, regresando al tanque de almacenamiento. El fluido de trabajo (agua potable) está contenido en la cuba térmica. Ambos fluidos tuvieron un acondicionamiento previo para llevar a cabo la prueba. En la Tabla 3.56 es posible observar los datos obtenidos.

Tabla 3.59 Resultados enfriamiento por camisa doble e intercambiador, salmuera al 5%. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3		
	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3 (°C)
0	45.6	29.5	31.1	45.6	30.6	32.3	45.6	30.1	31.7
0.5	45	29.2	30.8	45	30.2	31.9	44.9	29.8	31.4
1	44.4	29	30.6	44.4	29.9	31.5	44.2	29.5	31.1
1.5	43.7	28.7	30.3	43.8	29.6	31.2	43.7	29.2	30.7
2	43.1	28.5	30.1	43.2	29.3	30.9	43.1	28.9	30.4
2.5	42.4	28.3	29.8	42.6	29	30.5	42.5	28.7	30.2
3	41.9	28	29.5	42	28.8	30.3	41.9	28.4	29.8
3.5	41.3	27.8	29.3	41.5	28.5	29.9	41.4	28.2	29.6
4	40.7	27.6	29	41	28.3	29.7	40.8	28	29.4
4.5	40.3	27.4	28.8	40.4	28	29.4	40.3	27.8	29.2
5	39.7	27.2	28.6	39.9	27.8	29.2	39.8	27.5	28.8
6	38.7	26.6	28	39	27.3	28.6	38.8	27.2	28.5
7	37.8	26.5	27.8	38.1	26.9	28.2	37.9	26.8	28
8	36.9	26.2	27.5	37.2	26.6	27.8	37	26.4	27.6
9	36	25.9	27.1	36.3	26.2	27.4	36.2	26.1	27.2
10	35.3	25.5	26.7	35.6	25.9	27	35.4	25.8	26.9
11	34.5	25.3	26.5	34.8	25.5	26.6	34.7	25.5	26.6
12	33.7	25.1	26.2	34.1	25.3	26.4	34	25.3	26.4
Promedio	40.06	27.35	28.81	40.25	27.98	29.41	40.12	27.73	29.13

TIC1 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TIC1})	TIC3 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TIC3})	TI3 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TI3})
45.60	0	30.07	0.5508	31.76	0.5795
44.97	0.0577	29.73	0.5033	31.40	0.5182
44.33	0.1155	29.47	0.4509	31.11	0.4674
43.73	0.0577	29.17	0.4509	30.78	0.4428
43.13	0.0577	28.90	0.4000	30.49	0.3937
42.50	0.1000	28.67	0.3512	30.21	0.3431
41.93	0.0577	28.40	0.4000	29.92	0.3940
41.40	0.1000	28.17	0.3512	29.64	0.3310
40.83	0.1528	27.97	0.3512	29.42	0.3311
40.33	0.0577	27.73	0.3055	29.17	0.2840
39.80	0.1000	27.50	0.3000	28.90	0.2831
38.83	0.1528	27.03	0.3786	28.39	0.3269
37.93	0.1528	26.73	0.2082	28.05	0.1726
37.03	0.1528	26.40	0.2000	27.67	0.1713
36.17	0.1528	26.07	0.1528	27.30	0.1074
35.43	0.1528	25.73	0.2082	26.93	0.1734
34.67	0.1528	25.43	0.1155	26.60	0.0712
33.93	0.2082	25.23	0.1155	26.37	0.0642

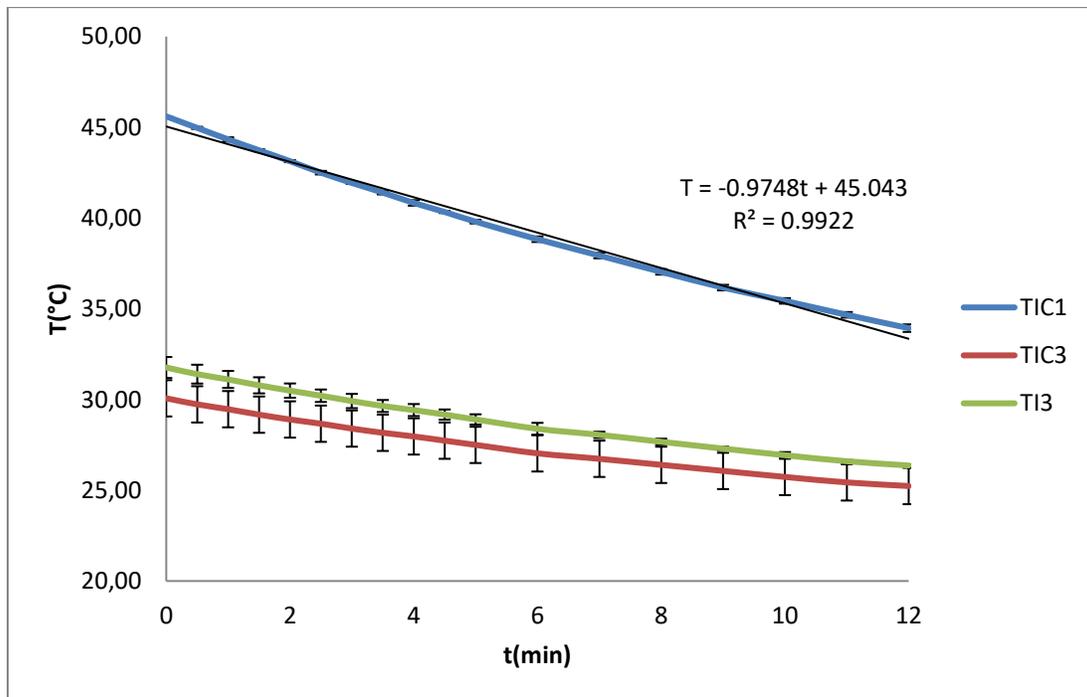


Fig. 3.82 Perfil de enfriamiento por camisa doble e intercambiador con fluido térmico de salmuera al 5% (promedio). Fuente: Propia

Las tres pruebas llevadas a cabo, indican un enfriamiento lineal del fluido de trabajo (TIC1) y un enfriamiento constante de la salmuera (TIC3 y TI2), como lo constata la Figura 3.82, la cual juega el rol de fluido de enfriamiento en este caso.

Para determinar las propiedades de la salmuera, fluido transportado por el serpentín, se calculó la temperatura promedio de cada prueba, cuyos valores numéricos están incluidos en la Tabla 3.57.

Tabla 3.60 Promedios TIC3+T13 para obtención de propiedades del fluido térmico. Fuente: Propia

	<i>Prueba 1</i>	<i>Prueba 2</i>	<i>Prueba 3</i>
	TIC3-T13 Promedio (°C)	TIC3-T13 Promedio (°C)	TIC3-T13 Promedio (°C)
	30.34	31.47	30.93
	30.03	31.05	30.62
	29.82	30.74	30.30
	29.52	30.41	29.99
	29.31	30.10	29.68
	29.08	29.77	29.46
	28.77	29.56	29.14
	28.56	29.24	28.92
	28.34	29.03	28.71
	28.13	28.71	28.51
	27.92	28.50	28.18
	27.31	27.96	27.86
	27.18	27.55	27.45
	26.86	27.23	27.02
	26.55	26.80	26.70
	26.12	26.49	26.39
	25.91	26.07	26.07
	25.70	25.85	25.85
Promedio	28.81	29.41	29.13

Sin embargo, para enriquecer aún más el entendimiento del comportamiento tanto del fluido térmico (salmuera) como el fluido de trabajo (agua potable), a continuación, se presenta el procedimiento específico para el cálculo de los coeficientes individuales de transferencia de calor del lado de la cuba agitada y de la camisa doble y el coeficiente global de transferencia de calor.

CUBA AGITADA (AGUA)

La ecuación (6) se utiliza de nuevo en esta sección para determinar el coeficiente convectivo de enfriamiento al interior de la cuba térmica.

Los valores de a dependen del tipo de medio calefactor y del agitador empleado, los cuales fueron presentados en la Tabla 3.50A

$$\frac{h_{cuba} D_j}{k} = 0.36 \left(\frac{L^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{c \mu}{k} \right)^{1/3} \text{ --- (18)}$$

Por consiguiente, se presentan los datos de propiedades referentes al fluido caliente (agua), con base en su temperatura promedio.

Tabla 3.61 Propiedades del fluido de trabajo. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
TIC1 Pm(°C)	40.06	40.25	40.12
μ (kg/ms)	0.0006548	0.0006526	0.0006541
c (J/kg°C)	4174	4174	4174
k (W/m°C)	0.6328	0.6331	0.6329
ρ (kg/m³)	992.01	991.93	991.98

(Holman, 1998)

Para averiguar la longitud de la paleta del agitador es necesario conocer cuál es el tipo. (Ver Anexo II)

Hélice de 3 palas	
Dj/L	3

CAMISA DOBLE (SALMUERA AL 5%)

Para los cálculos en camisa doble, es necesario emular el ánulo de un intercambiador de tubos concéntricos. A continuación, se muestran datos de temperatura promedio para obtener las propiedades de la salmuera en función de dicha temperatura, así como el flujo y la longitud de la camisa doble:

Tabla 3.63B Datos de temperatura, flujo y longitud de la camisa doble. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Temperatura promedio (°C)	28.81	29.41	29.13
% de flujo	56	56.5	57
Flujo total (L/h)	720		
W (L/h)	403.2	406.8	410.4
W (kg/h)	403.2	406.8	410.4
L camisa doble(m)	0.23		

El cálculo del área de flujo y del diámetro equivalente ya se realizó anteriormente en la Tabla 3.51B.

Posteriormente, calcular el gasto másico por metro cuadrado, estimar las propiedades de la salmuera a la temperatura promedio, y finalmente, los números adimensionales de Reynolds, Prandtl y Nusselt.

Tabla 3.64B Gasto másico, propiedades de la salmuera y números adimensionales. Fuente: Propia

Tabla 3.62A Longitud de la paleta. Fuente: Propia

Dj (m)	Diámetro del recipiente	0.2
N (rph)	Número de rph	15060
L (m)	Longitud de la paleta	0.0666

Sustituyendo los valores en la ecuación 18, se obtienen los siguientes coeficientes individuales del lado de la cuba agitada.

h_{cuba} (J/sm²°C)	121.68	121.56	121.64
--	--------	--------	--------

$$h_{cuba\ promedio} = 121.63 \frac{J}{sm^2°C}$$

Desv est	0.05937
----------	---------

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
G_a (kg/sm²)	16.204	16.34	16.49	Ecuación 10
μ (kg/ms)	0.0009097	0.0009009	0.0009050	(A Technical Databook of Geothermal Energy Utilization, .1981)
c (J/kg°C)	3947.5	3947.8	3947.7	
k (W/m°C)	0.6088	0.6096	0.6092	
Re	746.4	760.4	763.6	Ecuación 11
D_e/L	0.1821			
Pr	5.898	5.833	5.864	Ecuación 12
RePr D_e/L	802.15	808.2	815.9	
Nu_d	17.28	17.32	17.38	Ecuación 13

El valor del coeficiente se obtiene despejando Nusselt y reacomodando términos:

$$h_{camisa\ doble} = \frac{Nu_d * k}{D_e} \text{ --- (19)}$$

(Holman, 1998).

h_{camisa doble} (J/sm²°C)	251.1	252.07	252.7
--	-------	--------	-------

$$h_{camisa\ doble\ promedio} = 251.96 \frac{J}{sm^2°C}$$

Desv est	0.1964
----------	--------

En el enfriamiento por camisa doble e intercambiador se hace uso de los datos de la Tabla 3.53, y de las ecuaciones (15), (16) y (17) para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

En la ecuación (17), la simbología queda así:

$$T_{\text{fluido camisa doble}}(t) = \text{TIC1}$$

$$T_{\text{masa cuba agitada}}(t) = \text{Promedio TIC3+TI3}$$

Los resultados del coeficiente global se muestran en la Tablas 3.50 y los del calor transferido en la Tabla 3.61:

Tabla 3.65 Resultados coeficiente global de transferencia de calor y calor transferido. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
$1/U$ (s m ² °C/J)	0.01651	0.01650	0.01648
U (J/s*m ² °C)	60.56	60.59	60.64

Tabla 3.66 Resultados cálculo del calor transferido. Fuente: Propia

t(min)	Q Prueba 1 (W)	Q Prueba 2 (W)	Q Prueba 3 (W)	Q promedio(W)	Desviación estándar (σ _q)
0	46.20	42.80	44.49	44.50	1.700
0.5	45.33	42.27	43.31	43.64	1.556
1	44.16	41.40	42.14	42.56	1.428
1.5	42.94	40.56	41.57	41.69	1.196
2	41.77	39.69	40.70	40.72	1.040
2.5	40.33	38.86	39.56	39.58	0.738
3	39.76	37.68	38.68	38.71	1.041
3.5	38.59	37.15	37.85	37.86	0.720
4	37.42	36.28	36.67	36.79	0.578
4.5	36.85	35.41	35.76	36.01	0.751
5	35.67	34.54	35.23	35.15	0.574
6	34.50	33.43	33.18	33.71	0.700
7	32.15	31.96	31.70	31.94	0.227
8	30.41	30.21	30.26	30.29	0.103
9	28.63	28.77	28.82	28.74	0.097
10	27.80	27.60	27.34	27.58	0.231
11	26.02	26.46	26.16	26.21	0.226
12	24.24	24.98	24.72	24.65	0.377

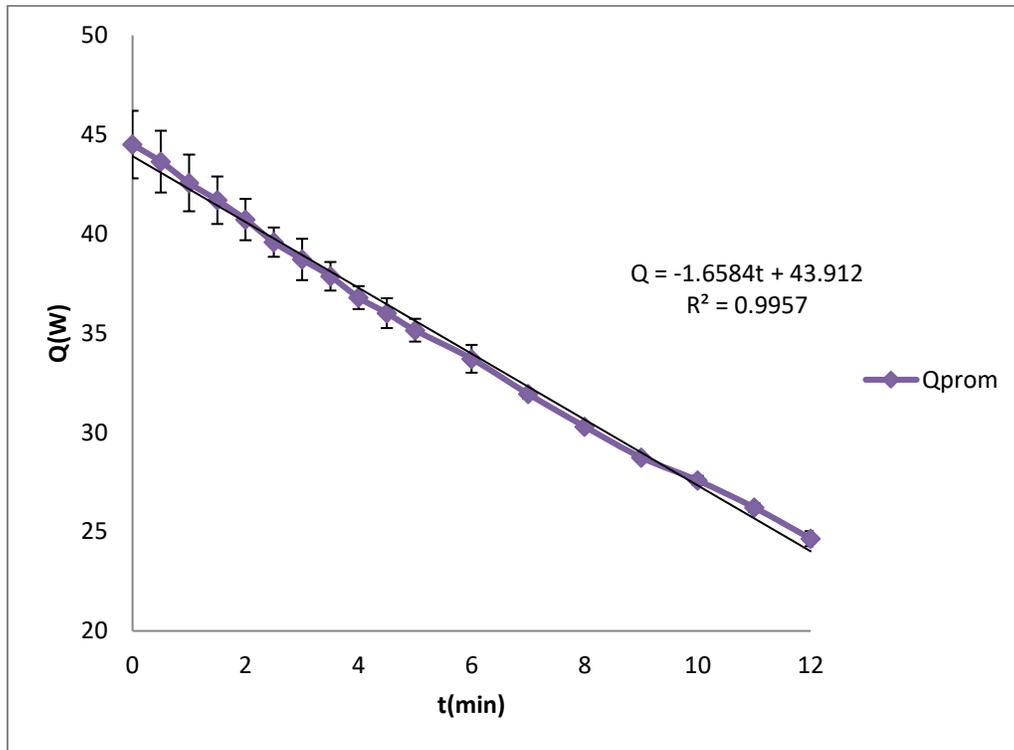


Fig. 3.83 Perfil Q - t de enfriamiento por camisa doble e intercambiador con fluido térmico de salmuera al 5% (promedio). Fuente: Propia

Al comparar el perfil de la Figura 3.83 con el anterior, se puede decir que el calor transferido en esta experimentación es visiblemente menor que en la calefacción por camisa doble.

La desviación estándar resulta ser más alta con respecto a la experimentación anterior, debido a que el fluido de enfriamiento no presenta un control de temperatura.

Se debe mencionar que los flujos establecidos para la salmuera en su función tanto de fluido de calentamiento como de enfriamiento, se mantuvieron en la medida de lo posible, similares para realizar una evaluación bajo un mismo comportamiento hidrodinámico.

3.3.4 CALEFACCIÓN POR SERPENTÍN

Esta prueba es similar a la calefacción por camisa doble, con la diferencia que el fluido de calentamiento (salmuera al 5%) circuló a través del serpentín. Las temperaturas son reportadas en la Tabla 3.62.

Tabla 3.67 Resultados calefacción por serpentín, salmuera al 5%. Fuente: Propia

t(min)	<i>Prueba 1</i>	<i>Prueba 2</i>	<i>Prueba 3</i>	TIC1 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ)
	TIC1(°C)	TIC1(°C)	TIC1(°C)		
0	23.1	23.1	23.1	23.10	4.351E-15
0.2833	25.1	24.8	25.1	25.00	0.1732
0.4333	26.1	25.8	26.1	26.00	0.1732
0.5333	26.8	26.6	26.9	26.77	0.1528
0.65	27.5	27.4	27.7	27.53	0.1528
0.75	28.1	28	28.3	28.13	0.1528
0.8666	28.8	28.7	29	28.83	0.1528
0.9666	29.4	29.4	29.5	29.43	0.0577
1.083	30.1	30	30.3	30.13	0.1528
1.2	30.7	30.7	30.9	30.77	0.1155
1.316	31.3	31.3	31.5	31.37	0.1155
1.466	32	32	32.2	32.07	0.1155
1.583	32.6	32.6	32.7	32.63	0.0577
1.716	33.2	33.2	33.5	33.30	0.1732
1.866	33.8	33.8	34.1	33.90	0.1732
2	34.4	34.3	34.6	34.43	0.1528
2.333	35.6	35.4	35.8	35.60	0.2000
2.683	36.7	36.3	36.9	36.63	0.3055
3.083	37.8	37.7	37.8	37.77	0.0577
Promedio	30.68	30.58	30.84		

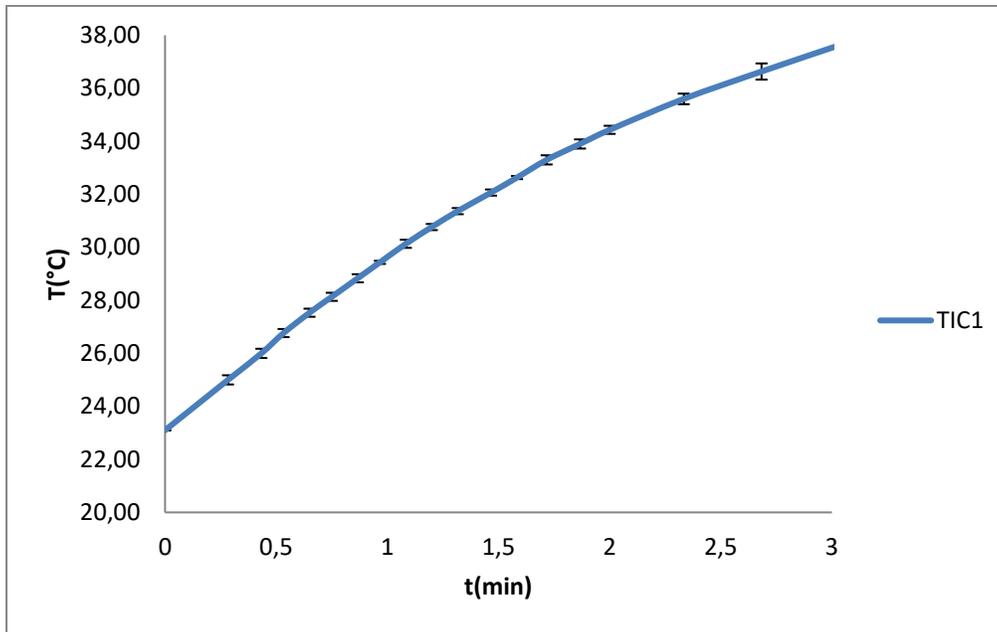


Fig. 3.84 Perfil de calefacción por serpentín con fluido térmico de salmuera al 5% (promedio). Fuente: Propia

El perfil obtenido de las pruebas de calentamiento por medio de serpentín mostrado en la Figura 3.84, arroja que la tasa de velocidad a la cual la transferencia se lleva cabo no es constante, ya que dicho perfil es notoriamente no lineal.

Derivado de lo anterior, la temperatura máxima que alcanza el fluido de trabajo es de 38°C, siendo que se llega a este valor a los 3 minutos de la experimentación, en contraste con el calentamiento por camisa doble, cuya temperatura máxima alcanzada es de 34°C, pero a un tiempo de 10 minutos. Esto es consecuencia de dos factores que influyen directamente: el primero es la diferencia del material de construcción (camisa doble -- vidrio, serpentín – acero inoxidable), a causa de que la conductividad térmica del material del serpentín ($k=16.28 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$), es 14 veces más alta que el material de la camisa doble ($k=1.16 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$), y el segundo es el área de transferencia que se tiene disponible, siendo el serpentín la mayor área de contacto con 0.06 m^2 , sobre los 0.05 m^2 del que dispone la camisa doble.

Para ahondar más en el estudio de la calefacción por serpentín, el cálculo de los coeficientes individuales, así como del coeficiente global de transferencia de calor se presenta a continuación:

CUBA AGITADA (AGUA)

La ecuación (6) se utiliza de nuevo en esta sección para la calefacción por serpentín.

Los valores de a dependen del tipo de medio calefactor y del agitador empleado.

Debido a que el fluido es agua, la expresión $(\frac{\mu}{\mu_{\omega}})^{0.14}$ es 1.

Tabla 3.68A Elección del valor de a . Fuente: Propia

AGITADOR	SUPERFICIE	a
Turbina	Chaqueta	0.62
Turbina	Serpentín	1.5
Paletas	Chaqueta	0.36
Paletas	Serpentín	0.87
Ancla	Chaqueta	0.54
Propela	Chaqueta	0.54
Propela	Serpentín	0.83

$$\frac{h_{cuba} D_j}{k} = 0.87 \left(\frac{L^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{c \mu}{k} \right)^{1/3} \text{ --- (20)}$$

Por consiguiente, se presentan los datos de propiedades referentes al fluido frío (agua), con base en su temperatura promedio.

Tabla 3.69A Propiedades del fluido de trabajo. Fuente: Propia

SERPENTÍN (SALMUERA AL 5%)

Para los cálculos en serpentín, es necesario emular una tubería recta, con su factor de corrección correspondiente. A continuación, se muestran datos de temperatura promedio para obtener las propiedades de la salmuera en función de dicha temperatura.

Tabla 3.71B Datos de temperatura y flujo del serpentín. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Temperatura promedio	45	45	45
% de flujo	55.5	55.7	55.8
Flujo total (L/h)	720		
W (L/h)	400	401	402
W (kg/h)	399.6	401.04	401.76

Es necesario mencionar que se procuró un flujo cercano al utilizado en camisa doble, con la finalidad de tener condiciones operativas similares.

Tabla 3.72B Medidas del serpentín

L(m)	2.375
D ext(m)	0.012
D int(m)	0.01
D espira (m)	0.1263
Superficie (m²)	0.06

Posteriormente estimar las propiedades de la salmuera a la temperatura promedio:

Tabla 3.73B Propiedades de la salmuera a la temperatura promedio. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
TIC1 Pm(°C)	30.69	30.58	30.84
μ (kg/ms)	0.0007911	0.0007930	0.0007886
c (J/kg°C)	4175.3	4175.4	4175.2
k (W/m°C)	0.6205	0.6203	0.6207
ρ (kg/m³)	995.14	995.16	995.12

(Holman, 1998)

Para averiguar la longitud de la paleta del agitador es necesario conocer cuál es el tipo. (Ver Anexo II)

Hélice de 3 palas	
Dj/L	3

Tabla 3.70A Longitud de la paleta. Fuente: Propia

Dj (m)	Diámetro del recipiente	0.2
N (rph)	Número de rph	15060
L (m)	Longitud de la paleta	0.06666

Sustituyendo los valores en la ecuación 20, se obtienen los siguientes coeficientes individuales del lado de la cuba agitada.

h _{cuba} (J/sm ² °C)	121.68	121.56	121.64
--	--------	--------	--------

$$h_{cuba\ promedio} = 121.63 \frac{J}{sm^2°C}$$

Desv est	0.05937
----------	---------

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
μ (kg/ms)	0.0006720	0.0006720	0.0006720
c (J/kg°C)	3955.1	3955.1	3955.1
k (W/m°C)	0.6303	0.6303	0.6303

(A Technical Databook of Geothermal Energy Utilization, 1981)

El valor del coeficiente se obtiene despejando h_{serpentín} de ecuación 22:

$$h_{serpentín} = \frac{k}{D} 1.86 \left(\frac{4wc}{\pi k L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad \text{--- (21)}$$

(Kern, 1992)

Dónde:

h_{serpentín}= coeficiente de transferencia de calor en J/sm²°C

D=Diámetro interno del serpentín en m

k= conductividad térmica en W/m°C

w=Flujo en kg/h

L= Longitud del serpentín en m

La anterior ecuación, debe multiplicarse por un factor de corrección con la finalidad de incluir el efecto de las espiras del serpentín:

$$factor\ de\ corrección = 1 + 3.5 \frac{D}{D_H} \quad \text{--- (22)}$$

(Kern, 1992)

Dónde:

D=Diámetro interno del serpentín en m

D_H= Diámetro del espiral en m

h _i (J/sm ² °C)	844.26	845.27	845.77
Factor corrección	1.277		
h _{serpentín} (J/sm ² °C)	1078.2	1079.5	1080.1

$$h_{serpentín\ promedio} = 1079.29 \frac{J}{sm^2°C}$$

Desv est	0.9875
----------	--------

Para efectuar los cálculos del serpentín

Tabla 3.74 Datos del serpentín

Superficie de intercambio (m ²)	0.06
K_{inox} (W/m ² °C)	16.82
espesor (m)	0.002

En la calefacción por serpentín se hace uso de las ecuaciones (15), (16) y (17) para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor. En la ecuación (17), la simbología queda así:

$$T_{fluido\ serpentin}(t) = \text{Promedio TIC3-TI3}$$

$$T_{masa\ cuba\ agitada}(t) = \text{TIC1}$$

Los resultados del coeficiente es presentado en la Tabla 3.67:

Tabla 3.75 Resultados del coeficiente global de transferencia de calor y del calor transferido. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1/U (s m ² °C/J)	0.004274	0.004271	0.004275
U (J/s*m ² °C)	233.95	234.12	233.89

Tabla 3.76 Resultados cálculo del calor transferido. Fuente: Propia

t(min)	Q Prueba 1 (W)	Q Prueba 2 (W)	Q Prueba 3 (W)	Q promedio(W)	Desviación estándar (σ_Q)
0	307.41	307.64	307.34	307.46	0.157
0.2833	279.34	283.76	279.27	280.79	2.571
0.4333	265.30	269.71	265.24	266.75	2.564
0.5333	255.48	258.47	254.01	255.99	2.275
0.65	245.65	247.23	242.78	245.22	2.257
0.75	237.23	238.81	234.36	236.80	2.253
0.867	227.40	228.97	224.54	226.97	2.248
0.967	218.98	219.14	217.52	218.55	0.892
1.083	209.15	210.71	206.29	208.72	2.240
1.2	200.73	200.88	197.87	199.83	1.693
1.317	192.31	192.45	189.45	191.40	1.690
1.467	182.48	182.62	179.63	181.58	1.687
1.583	174.06	174.19	172.61	173.62	0.874
1.717	165.64	165.76	161.39	164.26	2.490
1.867	157.22	157.33	152.97	155.84	2.487
2	148.79	150.31	145.95	148.35	2.212
2.333	131.95	134.85	129.11	131.97	2.873
2.683	116.51	122.21	113.67	117.46	4.349
3.083	101.07	102.55	101.04	101.55	0.861

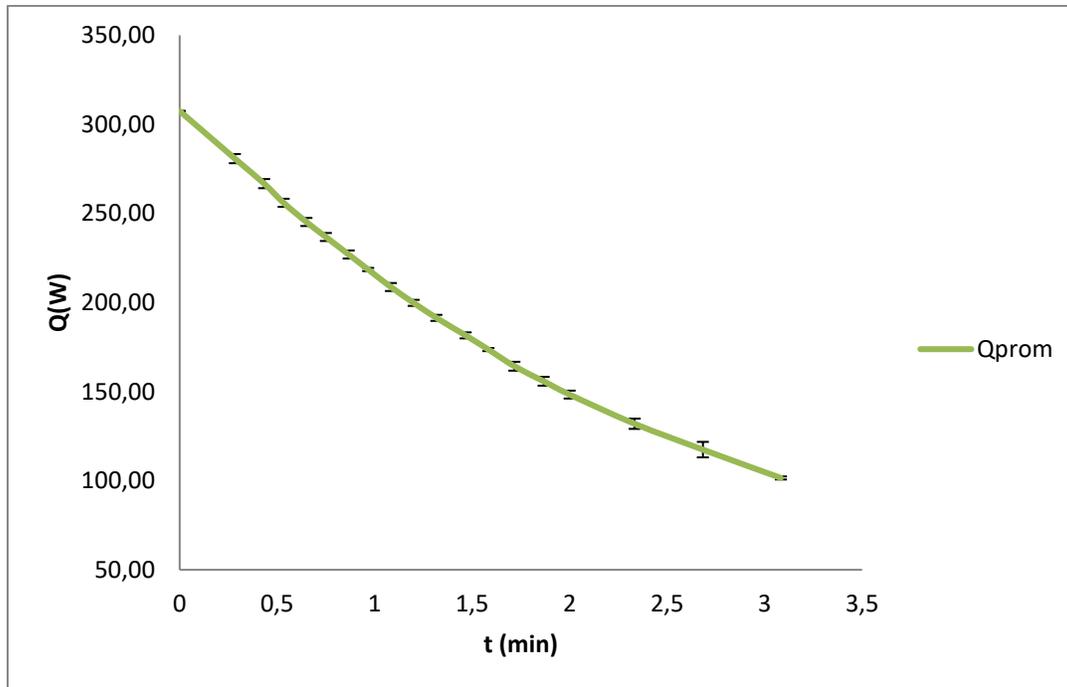


Fig. 3.85 Perfil Q-t de calefacción por serpentín con fluido térmico de salmuera al 5% (promedio). Fuente: Propia

En la Figura 3.85 se observa el perfil arrojado de variación de calor con respecto al tiempo. La tendencia de la velocidad de transferencia de calor es logarítmica, debido a que depende de la temperatura, la cual también presenta este mismo comportamiento. Sin embargo, el perfil muestra un decrecimiento, debido a que la temperatura del fluido de calentamiento es constante y la del fluido de trabajo aumenta, tendiendo hacia el equilibrio térmico.

La desviación estándar deriva en estos resultados, debido a que, a pesar, de tener control en el fluido de calentamiento, la velocidad con la cual se transfiere el calor se comporta logarítmicamente y no de manera constante.

3.3.5 ENFRIAMIENTO POR SERPENTÍN E INTERCAMBIADOR

Esta prueba es similar al enfriamiento por camisa doble e intercambiador, con la única diferencia que el fluido de enfriamiento ahora se transporta hacia el serpentín. También el fluido de enfriamiento y el de trabajo tuvieron un acondicionamiento previo a la experimentación realizada. Los resultados se presentan en la Tabla 3.69.

Tabla 3.77 Resultados enfriamiento por serpentín e intercambiador, salmuera al 5%. Fuente: Propia

t(min)	Prueba 1			Prueba 2			Prueba 3		
	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3(°C)	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3(°C)	TIC1(°C)	TIC3(°C)	TI3(°C)
0	47	29.6	38.1	47	30	38.1	47	30	36.7
0.5	44.2	29.5	34	44	29.9	34.2	44.2	29.7	33.9
1	41.6	29.5	33.3	41.4	29.9	33.5	41.6	29.7	33.2
1.5	39.4	29.5	32.5	39.4	29.9	32.9	39.5	29.7	32.6
2	37.7	29.5	32.1	37.7	29.8	32.3	37.8	29.6	32
2.5	36.3	29.3	31.6	36.3	29.6	31.8	36.3	29.5	31.5
3	35.1	29.1	31.1	35.1	29.5	31.3	35.1	29.3	31.1
3.5	34	28.9	30.6	34.1	29.2	30.8	34.1	29.1	30.6
4	33.2	28.8	30.2	33.2	29	30.3	33.3	28.9	30.2
4.5	32.4	28.5	29.8	32.5	28.7	30	32.5	28.6	29.8
5	31.8	28.2	29.4	31.9	28.5	29.6	31.8	28.4	29.5
6	30.6	27.7	28.7	30.8	28	29	30.7	27.9	28.8
Promedio	36.9	29.0	31.7	36.9	29.3	31.9	36.9	29.2	31.4

TIC1 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TIC1})	TIC3 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TIC3})	TI3 _{promedio} (°C)	Desviación estándar (σ_{TI3})
47.00	0	29.87	0.2309	37.63	0.8083
44.13	0.1155	29.70	0.2000	34.03	0.1528
41.53	0.1155	29.70	0.2000	33.33	0.1528
39.43	0.0577	29.70	0.2000	32.67	0.2082
37.73	0.0577	29.63	0.1528	32.13	0.1528
36.30	0	29.47	0.1528	31.63	0.1528
35.10	0	29.30	0.2000	31.17	0.1155
34.07	0.0577	29.07	0.1528	30.67	0.1155
33.23	0.0577	28.90	0.1000	30.23	0.0577
32.47	0.0577	28.60	0.1000	29.87	0.1155
31.83	0.0577	28.37	0.1528	29.50	0.1000
30.70	0.1000	27.87	0.1528	28.83	0.1528

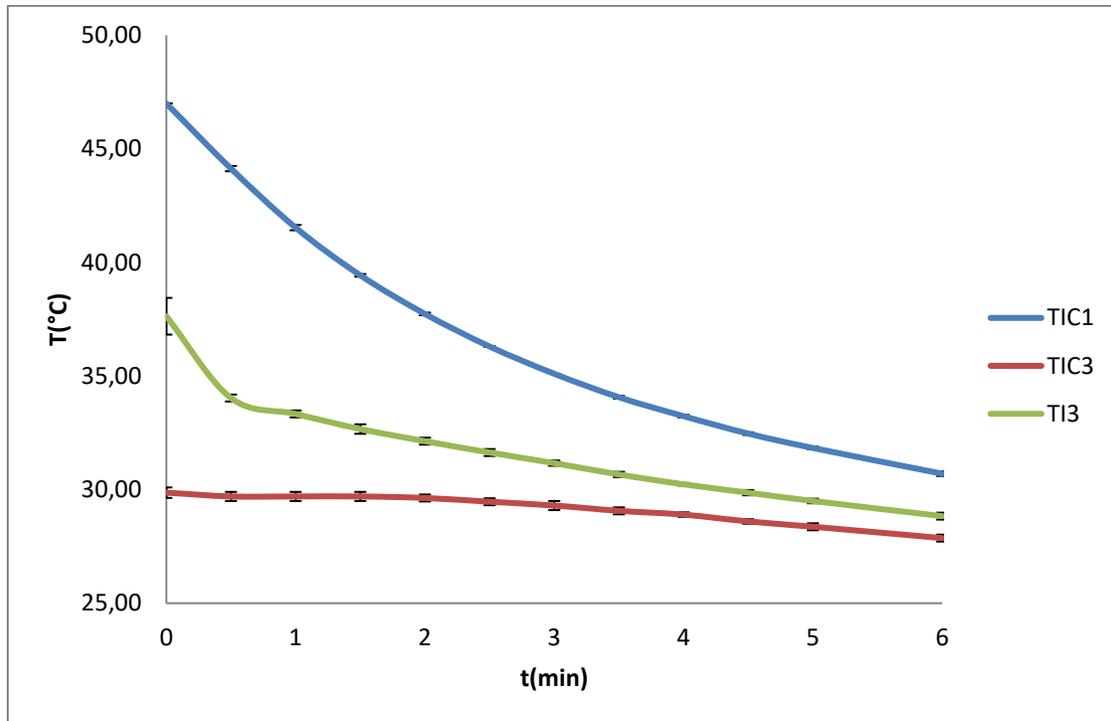


Fig. 3.86 Perfil de enfriamiento por serpentín e intercambiador con fluido térmico de salmuera al 5% (promedio). Fuente: Propia

Analizando los gráficos presentados, la temperatura del fluido de trabajo (TIC1) disminuye rápidamente, así como el fluido de enfriamiento, el cual tienen una tendencia a disminuir, pero no tan marcadamente como lo hace el fluido de trabajo, observando la Figura 3.86.

La tabla siguiente muestra la temperatura promedio a utilizarse para las propiedades de la salmuera de NaCl al 5% en peso.

Tabla 3.78 Promedios TIC3+TI3 para obtención de propiedades del fluido térmico. Fuente: Propia

	<i>Prueba 1</i>	<i>Prueba 2</i>	<i>Prueba 3</i>
	TIC3-TI3 Promedio (°C)	TIC3-TI3 Promedio (°C)	TIC3-TI3 Promedio (°C)
	33.85	34.05	33.35
	31.75	32.05	31.8
	31.4	31.7	31.45
	31	31.4	31.15
	30.8	31.05	30.8
	30.45	30.7	30.5
	30.1	30.4	30.2
	29.75	30	29.85
	29.5	29.65	29.55
	29.15	29.35	29.2
	28.8	29.05	28.95
	28.2	28.5	28.35
Promedio	30.39	30.65	30.43

Al igual que las tres anteriores experimentaciones expuestas, es necesario el cálculo de los coeficientes individuales y del coeficiente global de transferencia de calor, con la finalidad de obtener un panorama más detallado de la transferencia de calor. A continuación, son presentados los resultados:

CUBA AGITADA (AGUA)

La ecuación (6) se utiliza de nuevo en esta sección para el enfriamiento por serpentín e intercambiador.

Los valores de *a* dependen del tipo de medio calefactor y del agitador empleado, los cuales están reportados en la Tabla 3.63^a.

Debido a que el fluido es agua, la expresión $(\frac{\mu}{\mu_{\omega}})^{0.14}$ es 1.

$$\frac{h_{cuba} D_j}{k} = 0.87 \left(\frac{L^2 N \rho}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{c \mu}{k} \right)^{1/3} \text{ --- (23)}$$

Por consiguiente, se presentan los datos de propiedades referentes al fluido a enfriar (agua), con base en su temperatura promedio.

Tabla 3.79A Propiedades del fluido de trabajo. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
TIC1 Pm(°C)	36.94	36.95	36.99
μ (kg/ms)	0.0006945	0.0006943	0.0006937
c (J/kg°C)	4174	4174	4174
k (W/m°C)	0.6289	0.6289	0.6290
ρ (kg/m³)	993.28	993.28	993.26

(Holman, 1998)

Para averiguar la longitud de la paleta del agitador es necesario conocer cuál es el tipo. (Ver Anexo II)

SERPENTÍN (SALMUERA AL 5%)

Para los cálculos en serpentín, es necesario emular una tubería recta, con su factor de corrección correspondiente. A continuación, se muestran datos de temperatura promedio para obtener las propiedades de la salmuera en función de dicha temperatura.

Tabla 3.81B Datos de temperatura y flujo del serpentín. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Temperatura promedio	30.40	30.66	30.43
% de flujo	54	54.5	54.2
Flujo total (L/h)	720		
W (L/h)	388.8	392.4	390.24
W (kg/h)	388.8	392.4	390.24

Al igual que las calefacciones por camisa doble y serpentín, se estableció un flujo parecido para fines de condiciones operativas similares.

La Tabla 3.64B, anteriormente presentada contienen los datos de medidas del serpentín, las cuales también se usaron en esta prueba. Posteriormente estimar las propiedades de la salmuera a la temperatura promedio:

Tabla 3.82B Propiedades de la salmuera a la temperatura promedio. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
μ (kg/ms)	0.8875	0.8837	0.8882
c (J/kg°C)	3948.2	3948.4	3948.2
k (W/m°C)	0.61087	0.6112	0.6108

(A Technical Databook of Geothermal Energy Utilization, 1981).

El valor del coeficiente se obtiene despejando $h_{serpentín}$ de la ecuación 21 y multiplicando por el factor de corrección, obtenido de la

Hélice de 3 palas	
Dj/L	3

Tabla 3.80A Longitud de la paleta

Dj (m)	Diámetro del recipiente	0.2
N (rph)	Número de rph	15060
L (m)	Longitud de la paleta	0.06666

Sustituyendo los valores en la ecuación 23, se obtienen los siguientes coeficientes individuales del lado de la cuba agitada.

h_{cuba} (J/sm²°C)	298.89	298.87	298.80
---	--------	--------	--------

$$h_{cuba \text{ promedio}} = 298.85 \frac{J}{sm^2 \text{ } ^\circ C}$$

Desv est	0.04794
----------	---------

ecuación 22:

$h_{serpentín}$ (J/sm²°C)	818.79	821.63	819.74
Factor corrección	1.277		
$h_{serpentín}$ (J/sm²°C)	1045.7	1049.3	1046.9

$$h_{serpentín \text{ promedio}} = 1047.31 \frac{J}{sm^2 \text{ } ^\circ C}$$

Desv est	1.845
----------	-------

En el enfriamiento por camisa doble e intercambiador se hace uso de la Tabla 3.66, y de las ecuaciones (15), (16) y (17) para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor.

En la ecuación (17), la simbología queda así:

$$T_{\text{fluido serpentín}}(t) = \text{Promedio TIC3+TI3}$$

$$T_{\text{prom masa cuba agitada}}(t) = \text{TIC1}$$

Los resultados se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 3.83 Resultados coeficiente global de transferencia de calor y calor transferido. Fuente: Propia

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
$1/U$ (s m ² °C/J)	0.004420	0.004417	0.004420
U (J/s*m ² °C)	226.20	226.35	226.20

Tabla 3.84 Resultados cálculo del calor transferido. Fuente: Propia

t(min)	Q Prueba 1 (W)	Q Prueba 2 (W)	Q Prueba 3 (W)	Q promedio(W)	Desviación estándar (σ _Q)
0	178.47	175.88	185.26	179.87	4.845
0.5	168.97	162.30	168.30	166.52	3.673
1	138.43	131.74	137.76	135.98	3.685
1.5	114.00	108.65	113.33	112.00	2.915
2	93.65	90.32	95.01	92.99	2.412
2.5	79.40	76.06	78.72	78.06	1.765
3	67.86	63.83	66.50	66.07	2.049
3.5	57.68	55.68	57.68	57.02	1.153
4	50.22	48.21	50.90	49.78	1.394
4.5	44.11	42.78	44.79	43.89	1.021
5	40.72	38.71	38.68	39.37	1.167
6	32.57	31.24	31.89	31.90	0.668

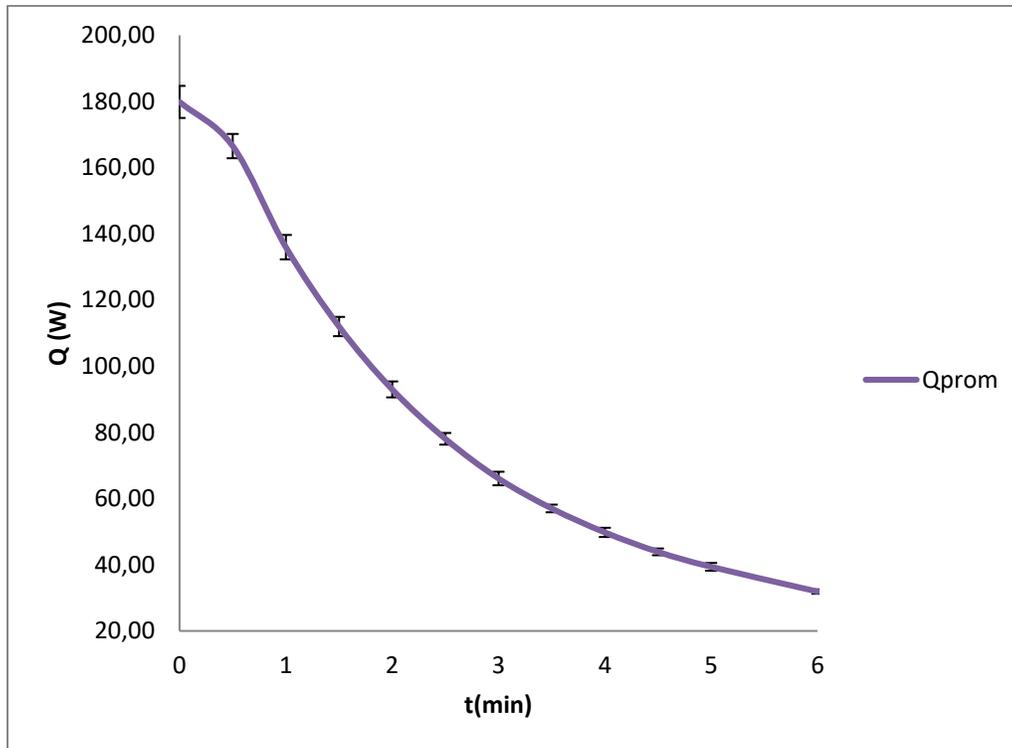


Fig. 3.87 Perfil Q-t de enfriamiento por serpentín e intercambiador con fluido térmico de salmuera al 5% (promedio). Fuente: Propia

El perfil de calor (Q) vs tiempo (t) de la Figura 3.87, es el que tienen la más alta desviación estándar de los cuatro experimentos realizados. Esto es debido a que no hay un control de temperatura tanto el fluido de enfriamiento como en el de trabajo.

Para finalizar esta sección es necesario comparar las configuraciones de calentamiento por camisa doble y calentamiento por serpentín. En la primera, se tienen valores de coeficiente global de transferencia de calor U de 63.05, 63.04 y 63.02 $\text{J}/\text{sm}^2\text{°C}$, para cada prueba respectivamente. Por otro lado, para la calefacción por serpentín se tiene un U de 233.95, 234.12 y 233.89 $\text{J}/\text{sm}^2\text{°C}$, valores pertenecientes a las tres pruebas realizadas en esta configuración. No obstante, los resultados obtenidos en cada prueba, indican que estadísticamente es un solo valor de U, ya que la diferencia no es significativa al ser unidades de transferencia de calor. Por ende, es totalmente observable, que el valor de U de la calefacción por serpentín es mayor que el de la calefacción por camisa doble,

definiéndose de este modo que la mejor configuración para la transferencia de calor por calefacción, bajo condiciones hidrodinámicas del fluido térmico similares, es por serpentín.

Realizando los mismos cálculos, pero para las configuraciones de enfriamiento por camisa doble y enfriamiento por serpentín, ambos con el intercambiador de grupo, se tiene lo siguiente. Para el enfriamiento por camisa doble e intercambiador los valores de U son 60.56, 60.59 y 60.64 $J/sm^2^{\circ}C$. Y para la otra configuración de enfriamiento por serpentín e intercambiador los valores de U son 226.20, 226.35 y 226.20 $J/sm^2^{\circ}C$. Estadísticamente, U tiene un solo valor. Analizando el valor arrojado, bajo condiciones hidrodinámicas del fluido térmico similares, el enfriamiento por serpentín e intercambiador resulta mejor.

Sin embargo, solo se ha definido que configuraciones resultan mejor para la transferencia de calor, pero el objetivo de este trabajo es determinar la funcionalidad de la salmuera como fluido de calefacción o de enfriamiento. Para decidir lo anterior, es necesario comparar la calefacción por serpentín y el enfriamiento por serpentín e intercambiador: los valores de la primera configuración de U son 233.95, 234.12 y 233.89 $J/sm^2^{\circ}C$, para la segunda configuración se tienen valores de U de 226.20, 226.35 y 226.20 $J/sm^2^{\circ}C$. Con lo anterior, se decide que la salmuera funciona mejor como un fluido térmico de calefacción.

CONCLUSIONES

Este trabajo de tesis permite demostrar la funcionalidad de la salmuera como fluido de enfriamiento o calentamiento, determinándose, como anteriormente se ha dicho, que la salmuera de NaCl al 5% funciona mejor como fluido de calentamiento, con en base en el al coeficiente global de transferencia de calor obtenido, en la calefacción por serpentín.

La adición de sal al agua, genera un cambio en las propiedades coligativas. En este caso, la temperatura de ebullición se eleva aproximadamente a 93°C y la temperatura de congelamiento disminuye a -3°C, razón por la cual se eligió como fluido térmico de estudio.

También existe la posibilidad de utilizar otro tipo de fluidos que se sabe son buenos agentes enfriadores, como los glicoles, para determinar sus coeficientes de transferencia de calor globales en este tipo de equipos.

La puesta en marcha de la Cuba Térmica, ubicada en la Planta Piloto de Ingeniería Química, se cumplió satisfactoriamente, lo anterior con base en los resultados de las pruebas preliminares, y recabados en la experimentación.

A través de los datos experimentales y el cálculo de los coeficientes convectivos del intercambiador de calor de grupo, se puede corroborar su adecuado funcionamiento para acondicionar el fluido que pasa por el serpentín y la camisa doble, siendo esta operación una etapa fundamental para definir a la salmuera como fluido de enfriamiento o calentamiento.

Por último, se cumple satisfactoriamente con la elaboración del Manual de Operación mediante la comprobación de la calibración de cada uno de los instrumentos que conforman la Cuba Térmica, así como toda la descripción de las experimentaciones presentadas en este trabajo.

La propuesta de práctica para determinar si una salmuera de NaCl al 5% en peso es mejor como fluido de enfriamiento o calentamiento, se cumple razonablemente acorde a los coeficientes globales de transferencia de calor obtenidos por los

cálculos presentados, donde el calentamiento por serpentín y enfriamiento por serpentín e intercambiador demuestran ser valores más grandes debido a la conductividad térmica del acero inoxidable, la cual es de 16.28 W/mK , y al área de transferencia de calor disponible, siendo su valor de 0.06 m^2 , con respecto al calentamiento y enfriamiento por camisa doble de vidrio, donde la conductividad térmica del vidrio es de (1.16 W/mK) y la superficie de intercambio es de 0.05 m^2 .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Kern, D. (1999) *Procesos de transferencia de calor*. México. México. CECSA
2. Incropera, F. (1999) *Fundamentos de transferencia de calor*. Cuarta Edición. México. México. Prentice Hall.
3. Valiente, A.; Noriega, J. (1993) *Manual del Ingeniero Químico*. México. LIMUSA.
4. Holman, J.P. (1998) *Transferencia de calor*. Madrid. España. McGrawHill.
5. Brown, G. G. (1965) *Operaciones básicas de la ingeniería química*. España. Editorial Marín.
6. Cengel, Y. (2007) *Transferencia de calor y masa*. Tercera Edición México. México. McGrawHill.
7. Geankoplis, C.J. (1998) *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Tercera Edición. México. México. CECSA.
8. Kreith, F. (2012) *Principios de transferencia de calor*. Séptima Edición. México. México. Cengage Learning.
9. Welty, J. (1994) *Fundamentos de transferencia de calor y masa*. Quinta Edición. México. México. LIMUSA.
10. Mijeev, M.A.; Mijeeva, I.M. (1979) *Fundamentos de termotransferencia*. Rumania. Editorial Mir Moscú
11. Manrique, J.A. (2005) *Transferencia de calor*. Segunda Edición. México. México. Alfaomega
12. Esplugas, S. (2005) *Fundamentos de transmisión de calor*. Barcelona. España. Publicacions I Edicions.
13. Dónde, M. (2005). *Transporte de momentum y calor. Teoría y aplicaciones a la ingeniería de proceso*. Mérida. Yucatán. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
14. Chapman, A. J. (1984) *Transmisión del calor*. Cuarta Edición. España. Madrid. BELLISCO.
15. Cao, E. (2004) *Transferencia de calor en ingeniería de procesos*. Primera Edición. Argentina. Editorial CSIC.
16. Mills, A. (1997) *Transferencia de calor*. Colombia. McGrawHill.

17. Romero, M.A. (2003) *Transferencia de calor en reactores* en Ingeniería de Reactores. [En línea]. México, disponible en: http://www.mty.itesm.mx/dia/deptos/iq/iq95-872/reactores/clase15_2003.pdf. [Accesado el día 23 de enero de 2018]
18. Rodríguez J.A. (1990) *Introducción a la Termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*. México. Universidad Tecnológica Nacional.
19. Valiente A. (2013) *Ingeniería del calor* en Academia.edu [En línea]. México, disponible en: http://www.academia.edu/29815144/Transferencia_de_calor [Accesado el día 15 de diciembre de 2017]
20. González, J. (1998). *Determinación experimental de coeficientes de transferencia de calor para convección libre y forzada*. Tesis de maestría. Nuevo León. División de estudios de postgrado, Universidad Autónoma de Nuevo León.
21. Perry, R. (1973). *Chemical Engineers Handbook*. Quinta edición. Estados Unidos de América. McGrawHill.
22. Edward, L.P. (2004). *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. Estados Unidos de América. Wiley Interscience.
23. Universidad de Buenos Aires. (2003). *Transferencia de calor en Carrera de especialización en Biotecnología Industrial*. [En línea]. Buenos Aires, Argentina, disponible en: <https://www.intec.edu.do/downloads/documents/biblioteca/formatos-bibliograficos/harvard-referencias-bibliograficas.pdf> [Accesado el día 6 de febrero de 2018]
24. Lienhard IV, J. H. y Lienhard V, J.H. (2017). *A heat transfer textbook*. Cuarta edición. Estados Unidos de América. Phlogiston Press.
25. Phillips, S.L., et.al. (1981). *A technical databook for geothermal energy utilization*. Berkeley, California. Universidad de California.
26. Roshenow, W.M., et.al. (1998). *Handbook of heat transfer*. Tercera edición. Estados Unidos de América. McGrawHill.
27. Rajput, R.K. (2012). *Heat and mass transfer in SI units*. Nueva Delhi, India. S. Chand & Company LDT.

28. Favre-Marinet, M. y Tardu, S. (2009). *Convective heat transfer*. Gran Bretaña. John Wiley & Sons, Inc.
29. PIGNAT S.A. (2002) *Conducción térmica de una cuba agitada Ref. CTC/3000 Manual Pedagógico*. Francia. PIGNAT S.A.

ANEXOS

ANEXO I. CARACTERIZACIÓN DEL INTERCAMBIADOR DEL GRUPO

El intercambiador de calor, ubicado en el grupo, es un intercambiador de coraza y tubos, el cual brinda el servicio de acondicionamiento del fluido de enfriamiento, durante los estudios de enfriamiento por camisa doble e intercambiador y enfriamiento por serpentín e intercambiador. Este intercambiador trabaja en flujo paralelo, alojando el fluido caliente en los tubos y el fluido frío en la coraza.

Se caracterizó el intercambiador de calor con la finalidad de tener conocimiento acerca de su funcionalidad durante las experimentaciones mencionadas con anterioridad. Los resultados que se presentan a continuación, corresponden a la salmuera (5%) como fluido térmico

I.I Enfriamiento por camisa doble e intercambiador.

Las temperaturas de salida del fluido frío del intercambiador de grupo, durante el enfriamiento por camisa doble e intercambiador, fueron:

Tabla I.I Temperaturas de salida del fluido frío del intercambiador de grupo

t(min)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	TI2(°C)	TI2(°C)	TI2(°C)
0	24.1	24.7	24.5
0.5	24	24.5	24.4
1	23.9	24.4	24.3
1.5	23.9	24.2	24.2
2	23.8	24.1	24.1
2.5	23.6	23.9	23.9
3	23.5	23.8	23.8
3.5	23.4	23.6	23.6
4	23.3	23.5	23.5
4.5	23.2	23.4	23.5
5	23.1	23.3	23.3
6	23	23	23.1
7	22.8	22.9	23
8	22.6	22.7	22.8
9	22.5	22.5	22.6
10	22.3	22.4	22.5
11	22.2	22.2	22.4
12	22.1	22.1	22.2
Promedios	23.18	23.4	23.42

Tabla I.II Datos del fluido frío en enfriamiento por camisa doble e intercambiador.

FLUIDO FRÍO: AGUA POTABLE				
Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
t_1 (°C)	17.3	17.6	17.7	Temperatura de entrada del fluido frío al intercambiador (temperatura ambiente)
t_2 (°C)	23.18	23.40	23.43	Esta temperatura se obtuvo del promedio de las mediciones de T12 que corresponde a la salida del intercambiador, reportados en la tabla I.I
Promedio	20.24	20.50	20.56	
cp (J/kg°C)	4179	4179	4179	(Holman, 1998)
w (l/h)	200	200	200	

Tabla I.III Datos del fluido caliente en enfriamiento por camisa doble e intercambiador

FLUIDO CALIENTE: SALMUERA DE NACL AL 5%				
Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
T_1 (°C)	30.44	31	30.69	$T_1 = \left(\frac{wcp}{WCp} (t_2 - t_1) \right) + T_2 - - (24)$
T_2 (°C)	27.35	27.98	27.73	Esta temperatura se obtuvo del promedio de las temperaturas TIC3, reportados en la tabla 4.29.
Promedio	28.89	29.49	29.21	
Cp (J/kg°C)	3947.5	3947.8	3947.7	(A Technical Databook of Geothermal Energy Utilization, 1981)
W (l/h)	403.2	406.8	410.4	

A continuación, se presenta la caracterización detallada del intercambiador de grupo para las pruebas de enfriamiento por camisa doble e intercambiador.

Coraza: Fluido frío, agua potable

Para comenzar con los cálculos, es importante mencionar que el arreglo de los tubos es triangular. En la tabla I.IVA se indica el diámetro interno de la coraza (D_{int}), el claro (C'), el espaciado entre tubos (P_T) y el espaciado entre deflectores (B).

Tabla I.IVA Datos de la coraza del intercambiador de grupo

D_{int} (mm)	86		
C' (mm)	1		
P_T (mm)	9	$P_T = DE \text{ tubos} + C' - - (25)$	(Kern, 1992)
B (mm)	17.2	$B = 0.2D_{int} - - (26)$	

Y con los datos de la anterior tabla, se procede a calcular el área de flujo, y una vez obtenida, con el flujo del fluido frío, se obtiene el gasto:

Tabla I.VA Área de flujo y gasto másico por área

a_s (m ²)	0.0001643	$a_s = D_{int} C' B / P_T - - (27)$	(Kern, 1992)
w (kg/h)	200		
G_s (kg/h m ²)	1216873.9	$G_s = w / a_s - - (28)$	(Kern, 1992)

Para continuar con los cálculos, es necesario reportar las propiedades del agua potable a la temperatura media t_a :

Tabla I.VIA Propiedades de fluido de enfriamiento a la temperatura media

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
t_a (°C)	20.24	20.5	20.56	
μ (kg/m s)	0.001001	0.00099	0.00099	(Holman, 1998)
μ (kg/m h)	3.606	3.583	3.577	
c (J/kg°C)	4180	4179	4179	

Tubos: Fluido caliente, salmuera

Para realizar la caracterización del lado de los tubos, es imprescindible contar con los datos de construcción (diámetro externo e interno, espesor, longitud), el número de tubos y los pasos por los mismos:

Tabla I.IVB Datos de los tubos del intercambiador de grupo y área de flujo

Pasos	1
Número de tubos	50
DE (mm)	8
Espesor (mm)	0.35
DI (mm)	7.3
L (m)	0.157
a_t' (mm ²)	41.85
a_t (mm ²)	2092.6

Después, es necesario calcular el área de flujo total de los tubos, así como el gasto másico por área, auxiliándose del flujo del fluido caliente:

Tabla I.VB Área de flujo y gasto másico por área

a_t (m ²)	0.002092	$a_t = N_t a_t' / n - - (29)$	(Kern, 1992)	
W (kg/h)	403.2	406.8	410.4	
G_t (kg/h m ²)	192670.3	194390.6	196110.9	$\frac{G_t}{a_t} = W / a_t$ (Kern, 1992) - - (30)

A continuación, se reportan las propiedades de la salmuera a la temperatura media T_a :

Tabla I.VIB Propiedades del fluido caliente a la temperatura promedio (salmuera 5 %)

k (W/m°C)	0.6025	0.6030	0.6031
------------------	--------	--------	--------

Por consiguiente, se realizó el cálculo del diámetro equivalente, el número de Reynolds, el número Prandtl y se debe realizar la lectura de j_H en el monograma reportado en la literatura para este tipo de intercambiadores.

Tabla I.VIIA Diámetro equivalente, Reynolds, j_H y Prandtl

D_e (m)	0.003086	$D_e = \frac{4x(1/2P_T x 0.86P_T - 1/2\pi d_0^2/4)}{1/2\pi d_0} \dots (31)$		(Kern, 1992)
Re	1041.3	1048.2	1049.9	$Re = D_e G_s / \mu \dots (32)$
j_H	14	15	15	
Pr	1.908	1.903	1.902	$Pr = c\mu/k^{1/3} \dots (33)$

Por último se realiza el cálculo de h_o :

$$h_o = j_H \frac{k}{D} \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \dots (36)$$

(Kern, 1992)

h_o (J/s*m²*°C)	5215.7	5578.5	5576.1
-------------------------------------	--------	--------	--------

h_o promedio (J/s*m²*°C)	5456.82
--	----------------

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
T_a (°C)	28.89	29.49	29.21	
μ (g/cm s)	0.008381	0.00829	0.008337	(A Technical Databook of Geothermal Energy Utilization, 1981)
μ (kg/m s)	0.000838	0.00082	0.000833	
c (J/kg°C)	3947.5	3947.8	3947.7	
k (W/m°C)	0.6088	0.6096	0.6092	

Luego, se realizó el cálculo del número de Reynolds, L/D y número de Prandtl para determinar el factor de transferencia de calor (j_H), y posteriormente, el h_i .

Tabla I.VIIIB Diámetro, Reynolds, j_H , Prandtl y h_i

D (m)	0.0073			
Re_t	466.15	474.96	476.94	$Re = DG_t/\mu \dots (34)$ (Kern, 1992)
L/D	21.50			
j_H	4.8	4.8	4.9	
Pr	1.7588	1.751	1.754	Ecuación 33
h_i/ϕ	703.8	702.1	717.6	$h_i = j_H \frac{k}{D} \left(\frac{c\mu}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \dots (35)$ (Kern, 1992)

Para finalizar se realiza la corrección de h_i a h_{io} con los diámetros interno y externo de los tubos:

$$\frac{h_{io}}{\phi_t} = \frac{h_o}{\phi_i} x \frac{DI}{DE} \dots (37)$$

(Kern, 1992)

$\phi_t=1$ porque el fluido es una solución de baja concentración.

h_{io} (J/s*m²*°C)	642.266	640.74	654.82
--	---------	--------	--------

h_{io} promedio (J/s*m²*°C)	645.94
---	---------------

Una vez calculados los coeficientes individuales, se procedió a determinar el coeficiente global limpio de transferencia de calor para el intercambiador.

$$U_c = \frac{h_{i0} * h_o}{h_{i0} + h_o} \text{ --- (38)}$$

(Kern, 1992)

Tabla I.VIII Resultados del cálculo del coeficiente limpio de transferencia de calor en enfriamiento por camisa doble e intercambiador

Uc (J/s*m ² *°C)	571.84	574.72	586
Desv est		7.483	
Uc promedio(J/s*m ² *°C)		577.5	

I.II Enfriamiento por serpentín e intercambiador

En la tabla I.IX se muestran las temperaturas de salida del fluido frío del intercambiador para la prueba de enfriamiento por serpentín.

Tabla I.IX Temperaturas de salida del fluido frío del intercambiador de grupo

t(min)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
	TI2(°C)	TI2(°C)	TI2(°C)
0	26.1	26	24.4
0.5	24.2	24.6	24.3
1	24.2	24.5	24.4
1.5	24.2	24.5	24.4
2	24.2	24.4	24.3
2.5	24.1	24.3	24.3
3	24	24.2	24.2
3.5	23.8	24.1	24
4	23.8	24	23.9
4.5	23.5	23.9	23.8
5	23.4	23.7	23.6
6	23.4	23.5	23.4
Promedio	24.08	24.31	24.08

Tabla I.X Datos del fluido frío en enfriamiento por serpentín e intercambiador.

FLUIDO FRÍO: AGUA POTABLE				
Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
t_1 (°C)	17.5	17.5	18	Temperatura de entrada del fluido frío al intercambiador (temperatura ambiente)
t_2 (°C)	24.08	24.31	24.08	Esta temperatura se obtuvo del promedio las mediciones de TI2 que corresponde a la salida del intercambiador, reportados en la tabla I.IX.
Promedio	20.79	20.90	21.04	
cp (J/kg°C)	4179	4179	4179	(Holman, 1998)
w (l/h)	200	200	200	Este flujo es manipulable y es estipulado en la información del fabricante.

Tabla I.XI Datos del fluido caliente en enfriamiento por serpentín e intercambiador.

FLUIDO CALIENTE: SALMUERA DE NACL AL 5%				
Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
T_1 (°C)	33.97	34.23	33.92	Ecuación 24
T_2 (°C)	30.40	30.66	30.35	Estas temperaturas se obtuvieron del promedio de las temperaturas TIC3 + TI3, reportados en la tabla 4.40.
Promedio	32.19	32.45	32.14	
Cp (J/kg°C)	3948.29	3948.41	3948.27	(A Technical Databook of Geothermal Energy Utilization, 1981)
W (l/h)	388.8	392.4	390.24	

A continuación, se presenta la caracterización del intercambiador por serpentín.

Coraza: Fluido frío, agua potable

Los datos de la coraza necesarios para comenzar los cálculos están reportados en la tabla I.IVA.

El cálculo del área de flujo y del gasto másico por área se reportó en la tabla I.VA.

Para continuar con los cálculos, es necesario reportar las propiedades del agua potable a la temperatura media t_a :

Tabla I.XIIIA Propiedades de fluido de enfriamiento a la temperatura media

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
t_a (°C)	20.79	20.90	21.04	
μ (kg/m s)	0.00098	0.0009	0.0009	
μ (kg/m h)	3.5572	3.5466	3.5342	
c (J/kg°C)	4179.40	4179.2	4179.0	(Holman, 1998)
k (W/m°C)	0.6034	0.6036	0.6038	

Por consiguiente se realiza el cálculo del diámetro equivalente, el número de Reynolds, el número Prandlt y se debe realizar la lectura de j_H en el nomograma indicado en la siguiente tabla:

Tabla I.XIIIA Diámetro equivalente, Reynolds, j_H y Prandlt**Tubos: Fluido caliente, salmuera**

Para la caracterización de los tubos, la información necesaria se puede encontrar en la tabla I.IVB.

Se procede a calcular el área de flujo total de los tubos, así como el gasto másico por área, auxiliándose del flujo del fluido caliente:

Tabla I.XIIB Área de flujo y gasto másico por área

a_t (m ²)	Ecuación 30			
W (kg/h)	388.8	392.4	390.24	
G_t (kg/h m ²)	185789.2	187509.5	186477.3	Ecuación 31

A continuación se reportan las propiedades de la salmuera a la temperatura media T_a :

Tabla I.XIIIB Propiedades de fluido de calentamiento a la temperatura media

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
T_a (°C)	32.19	32.45	32.14	
μ (g/cm s)	0.008611	0.008573	0.008619	(A Technical Databook of Geothermal Energy Utilization, 1981)
μ (kg/m s)	0.000861	0.000857	0.000861	
c (J/kg°C)	3949.1	3949.2	3949.1	
k (W/m°C)	0.6132	0.6136	0.6131	

Luego se realiza el cálculo de Reynolds, L/D para la lectura de j_H , del Prandlt y de h_i :

Tabla I.XIVB Diámetro, Reynolds, j_H , Prandlt y h_i

D_e (m)	0.0030867	Ecuación 31		
Re	1055.9	1059.06	1062.8	Ecuación 32
j_H	16	16	16	
Pr	1.898	1.896	1.893	Ecuación 33

Por último, se realiza el cálculo de h_o con la ecuación (36)

h_o (J/s*m²*°C)	5938.8	5934.1	5928.5
---	--------	--------	--------

h_o promedio (J/s*m²*°C)	5933.8
--	---------------

D (m)	0.0073			
Re_t	437.46	443.51	438.71	Ecuación 34
L/D	21.50			
j_H	4.1	4.2	4.1	
Pr	1.770	1.767	1.770	Ecuación 33
hi/φ	609.66	623.83	609.79	Ecuación 35

Para finalizar se realiza la corrección de h_i a h_{io} con los diámetros interno y externo de los tubos, con la ecuación (37)

h_{io}(J/s*m²*°C)	642.26	640.74	654.82
---	--------	--------	--------

h_{io} promedio(J/s*m²*°C)	645.94
--	---------------

Para complementar los cálculos anteriormente presentados, se calculó el coeficiente global limpio de transferencia de calor con la ecuación (38):

Tabla I.XV Resultados del cálculo del coeficiente limpio de transferencia de calor en enfriamiento por serpentín e intercambiador

Uc (J/s*m²*°C)	508.6	519.4	508.6
Desv est		6.203	
Uc promedio (J/s*m²*°C)		512.2	

La caracterización del intercambiador de grupo se llevó a cabo con la finalidad de validar su funcionamiento, ya que juega un rol fundamental para acondicionar el fluido de enfriamiento (salmuera al 5 %) de la cuba térmica. De manera particular, la salmuera es el fluido caliente en el intercambiador de grupo.

Lo que se puede observar es que el agua potable (fluido frío del intercambiador), al tener un flujo constante, permite un acondicionamiento del fluido caliente.

Los cálculos del intercambiador, finalizaron en ambos casos en el coeficiente global de transferencia de calor limpio, porque al ser prácticamente nuevo el equipo, se encuentra libre de incrustaciones que pudieran derivar en la necesidad de calcular el factor de obstrucción.

ANEXO II. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LA PALETA DEL AGITADOR

El cálculo de la longitud de la paleta se debe realizar, ya que es imprescindible a la hora de conocer el coeficiente individual de transferencia de calor del lado de la cuba térmica, dado que la ecuación (6), así lo requiere.

Para conocer dicha longitud, es necesario revisar la siguiente tabla, Elegir el tipo de rodete instalado en el agitador. Es importante mencionar que la información del fabricante no establece el tipo de rodete, por lo que se hizo una observación directa. Realizada esta observación, se estableció que el agitador era tipo hélice de tres palas.

Tipo de rodete	$\frac{D_j}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	Hojas cort.	N_i	Ref	Tipo de rodete	$\frac{D_j}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	$\frac{Z_i}{D_i}$	Hojas cort.	N_i	Ref
				N_i	w/D_i						N_i	w/D_i	
Turbina de 6 palas planas  $0,25 D_i$	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,17	1 7	Dos paletas  $0,25 D_i$	4,35	4,3	0,29	3	0,11	8 3
Igual que en el n.º 1	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	2 7	Cuatro paletas. Ver n.º 8	3	3	0,5	0		16 2
Igual que en el n.º 1	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,04	4 7	Dos paletas. Ver n.º 8	3	3,2	0,33	0		20 4
Igual que en el n.º 1; $a = 1, b = 40$	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		14* 7	Dos paletas. Ver n.º 8	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	10 7
Turbina de 6 palas curvadas Tam. de palas como en n.º 1 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	3 7	Dos paletas. Ver n.º 8 Ancho de paleta = $0,13 D_i$	1,1	0,5	0,19	0		29 10
Turbina 6 palas forma flecha Tam. de pala como en n.º 1 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	5 7	Dos paletas. Ver n.º 8 Ancho de paleta = $0,17 D_i$	1,1	0,4	0,10	0		29 10
Turbina radial con anillo deflector 				0		7 9	Hélice de 3 palas Paso de la hélice = $2 D_i$ 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	15 7
Turbina cerrada, de 6 palas. Anillo deflector de 20 hojas	2,4	0,74	0,9	0		11 6	Igual que el n.º 15; $a=1,7, b=18$	3,3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		21* 7
Semejante, mas no idéntica a la n.º 11	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		12 7	Igual que el n.º 15, pero con paso = $1,33 D_i$	16			3	0,06	18 5
Igual que la 12, pero sin anillo deflector.	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	13 7	Igual que el n.º 15, pero con paso = $1,09 D_i$	9,6			3	0,06	23 5
Turbina axial de 8 palas con ángulo de 45° . Ver n.º 17 	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	9 7	Igual que el n.º 15, pero con paso = $1,05 D_i, a = 2,3, b = 18$	2,7	2,7-3,9	0,75-1,3	0		27* 7
Turbina axial 4 palas con ángulo de 60° 	3	3	0,50	0		17 2	Igual que el n.º 15, pero con paso = $1,04 D_i, a = 0, b = 18$	4,5	2,7-3,9	0,75-1,3	0		25* 7
Turbina axial de 4 palas con ángulo de 45° . Ver n.º 17.	5,2	5,2	0,87	0		19 2	Igual que el n.º 15, pero con paso = D_i	3	2,7-3,9	0,75-1,3	4	0,10	24 7
Igual que la n.º 19	2,4-3,0	2,4-3,0	0,4-0,5	0		22 2	Igual que el n.º 15, pero con paso = $D_i; a = 2,1, b = 18$	3	2,7-3,9	0,75-1,3	0		24* 7
Disco con 16 paletas 	2,5	2,5	0,75	4	0,25	6 1	Igual que el n.º 15, pero con paso = D_i	3,8	3,5	1,0	0		28 8

D_i = diámetro del rodete; D_j = diámetro del depósito; n = n.º de revoluciones por segundo; w = ancho de las hojas del cortacorrientes; Z_i = altura que está el rodete sobre el fondo del depósito; Z_i = altura del nivel del líquido en el depósito.

Figura II.1 Datos necesarios para el cálculo de la longitud de la paleta del agitador

(Brown, 1965)

Por ende, teniendo la relación D_j/D_i , donde $D_i = L =$ longitud de la paleta en m y $D_i =$ diámetro de la cuba, se efectúa el siguiente cálculo:

$$\frac{D_j}{L} = 3$$

$$D_j = 0.2 \text{ m}$$

$$\frac{0.2 \text{ m}}{L} = 3$$

$$L = \frac{0.2 \text{ m}}{3} = 0.0666 \text{ m}$$