



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE HIELO EN BLOQUE PARA EL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN”

**HERNÁNDEZ MENESES JONATHAN MARCELO
TRUJILLO CASTILLO JOFFRE FERNANDO**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

RIOBAMBA – ECUADOR

2015

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2013-04-18

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

JONATHAN MARCELO HERNÁNDEZ MENESES

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE HIELO EN BLOQUE
PARA EL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Marco Santillán G.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Jorge Lema M.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Ángel Jácome D.
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JONATHAN MARCELO HERNÁNDEZ MENESES

TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE HIELO EN BLOQUE PARA EL LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN”

Fecha de Examinación: 2015-02-19

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán G. PRESIDENTE DE TRIBUNAL			
Ing. Jorge Lema M. DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Ángel Jácome D. ASESOR DE TESIS			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Santillán G.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2013-04-18

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

JOFFRE FERNANDO TRUJILLO CASTILLO

Titulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE HIELO EN BLOQUE
PARA LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Ing. Marco Santillán G.
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Jorge Lema M.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Ángel Jácome D.
ASESOR DE TESIS

ESPOCH

Facultad de Mecánica

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: JOFFRE FERNANDO TRUJILLO CASTILLO

TÍTULO DE LA TESIS: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE HIELO EN BLOQUE PARA LABORATORIO DE REFRIGERACIÓN”

Fecha de Examinación: 2015-02-19

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marco Santillán G. PRESIDENTE DE TRIBUNAL			
Ing. Jorge Lema M. DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Ángel Jácome D. ASESOR DE TESIS			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marco Santillán G.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos - científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Jonathan Marcelo Hernández Meneses

Joffre Fernando Trujillo Castillo

DEDICATORIA

A Dios, quien guía cada paso de mi vida, por darme salud, inteligencia y fortaleza para alcanzar las metas que me propongo. A mis padres, Julissa y Marcelo, que me apoyaron y confiaron en mí en todo momento; espero de todo corazón estén orgullosos de mí, este triunfo es de ustedes. A mi esposa, Pamela, que me apoyo y acompaño en el camino para lograr esta meta. A mis hermanos y sobrinas quienes con sus muestras de cariño llenan mi vida de felicidad y me ayudan a ser una mejor persona.

Finalmente, hago participe de este logro a todos mis familiares y amigos que me brindaron su apoyo y recorrieron junto a mí esta parte de mi vida.

Jonathan Marcelo Hernández Meneses

A mi familia, por ellos soy lo que soy. Gracias a mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda incondicional en los momentos difíciles y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar; me han dado todo lo que soy como persona, mis valores y principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia y mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis maestros, quienes nunca desistieron al enseñarme, a mis queridos amigos y compañeros que me apoyaron y creyeron en mí.

A mi novia Rocío, quien me apoyó y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.

Joffre Fernando Trujillo Castillo

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

Y en especial para todos los amigos, compañeros y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa de nuestras vidas.

Jonathan Marcelo Hernández Meneses

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad.

Y en especial para todos los amigos, compañeros y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa de nuestras vidas.

Joffre Fernando Trujillo Castillo

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	2
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 Hielo, producción y aplicaciones	4
2.1.1 <i>Introducción</i>	4
2.2 Generador de hielo	4
2.2.1 <i>Definición</i>	4
2.2.2 <i>Subsistemas principales</i>	5
2.3 Generador de hielo en bloque	6
2.3.1 <i>Aplicación</i>	7
2.3.2 <i>Ventajas</i>	7
2.3.3 <i>Diseño y dimensiones</i>	8
2.3.4 <i>Funcionamiento, generación y almacenamiento del hielo</i>	8
2.4 Conceptos de transferencia de calor.....	9
2.4.1 <i>Conducción de calor</i>	10
2.4.2 <i>Fundamentos de la convección</i>	12
2.4.2.1 <i>Coefficiente de transferencia de calor por convección</i>	13
2.4.3 <i>Sistema de control</i>	25
3. PROYECCIÓN Y DISEÑO	26
3.1 Definición del problema.....	26
3.2 Alternativas de solución	26
3.2.1 <i>Generador de hielo en bloques, generado por compresión de hielo</i>	26
3.2.2 <i>Generador de hielo en bloques, generación por inmersión en salmuera</i>	26
3.3 Selección mejor alternativa	27
3.4 Selección del refrigerante primario de trabajo	28
3.5 Selección del refrigerante secundario	28
3.5.1 <i>Agua</i>	29
3.5.2 <i>Salmuera</i>	29
3.5.3 <i>Glicoles inhibidos</i>	30

3.5.4	<i>CO₂</i>	30
3.5.5	<i>Cloruro de calcio</i>	30
3.6	Proyección para el diseño	31
3.7	Cálculo de espesor de aislante	32
3.7.1	<i>Convección libre - aire exterior</i>	32
3.7.2	<i>Convección forzada interior –cloruro de calcio</i>	34
3.8	Cálculo de la carga térmica.....	39
3.8.1	<i>Flujo de calor para generar hielo</i>	39
3.8.2	<i>Flujo de calor al ambiente</i>	49
3.9	Selección de los elementos para la unidad frigorífica.....	55
3.9.1	<i>Parámetros de funcionamiento</i>	56
3.9.2	<i>Selección del evaporado</i>	56
3.9.3	<i>Selección unidad condensadora</i>	57
3.9.4	<i>Dispositivos de control de flujo de refrigerante</i>	59
3.9.5	<i>Selección de las tuberías</i>	59
3.10	Dispositivos de control	60
3.10.1	<i>Termostato</i>	60
3.10.2	<i>Presóstato</i>	61
3.11	Selección de la bomba y sistema hidráulico	61
3.11.1	<i>Caudal de bombeo</i>	61
3.11.2	<i>Determinación del diámetro de descarga</i>	62
3.11.3	<i>Determinación del diámetro de succión</i>	63
3.11.4	<i>Determinación de la altura dinámica total</i>	63
3.11.5	<i>Cálculo de la carga dinámica en la descarga</i>	63
3.11.6	<i>Cálculo de la carga dinámica en la succión</i>	67
3.12	Diseño del tanque	73
3.12.1	<i>Características necesarias en el tanque</i>	73
3.12.2	<i>Material y dimensiones del tanque</i>	74
3.12.3	<i>Estudio de resistencia a cargas externas</i>	76
3.13	Diseño de la estructura	81
3.13.1	<i>Características necesarias en la estructura</i>	81
3.13.2	<i>Estudio de resistencia a cargas externas</i>	82
3.14	Diseño del agitador	86
3.15	Diseño de la matriz de sensores	88
3.16	Selección de los elementos para el sistema de control automático	89
3.16.1	<i>Controlador digital de temperatura</i>	90
3.16.2	<i>Sensor de nivel</i>	91

3.16.3	<i>Contactor</i>	92
3.16.4	<i>Temporizador</i>	93
3.16.5	<i>Arduino</i>	95
3.16.6	<i>Sensor de temperatura</i>	96
3.16.7	<i>Relé</i>	97
4.	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	99
4.1	Generalidades.....	99
4.2	Diagrama de proceso general	100
4.3	Actividades previas a la fase de construcción	101
4.3.1	<i>Elaboración de planos para construcción.</i>	101
4.3.2	<i>Requerimiento de materiales y equipos.</i>	101
4.3.3	<i>Recepción del material.</i>	101
4.4	Construcción del tanque de almacenamiento.....	102
4.5	Construcción de la estructura.....	103
4.6	Construcción de los moldes.	104
4.7	Ensamble del equipo.....	106
4.8	Diseño y ensamble del tablero de control.....	106
4.8.1	<i>Diagrama del circuito de control</i>	106
4.8.2	<i>Programación de arduino</i>	107
4.8.3	<i>Diagrama de circuito de potencia</i>	115
4.8.4	<i>Descripción interna del tablero de control.</i>	116
4.8.5	<i>Descripción externa del tablero de control</i>	117
5.	ANÁLISIS DE COSTOS	118
5.1	Introducción	118
5.2	Costos directos	118
5.3	Costos indirectos.....	122
6.	FASE EXPERIMENTAL	123
6.1	Etapas de análisis	123
6.1.1	<i>Puesta en marcha del proceso</i>	123
6.1.2	<i>Etapas de enfriamiento la salmuera</i>	124
6.1.3	<i>Etapas de enfriamiento del agua.</i>	124
6.1.4	<i>Etapas de generación de hielo</i>	124
6.2	Etapas de estudio de datos adquiridos en el proceso	125
6.2.1	<i>PRÁCTICA # 1</i>	125

6.2.2	<i>PRÁCTICA # 2</i>	128
6.3.3	<i>PRÁCTICA # 3</i>	129
6.3.4	<i>PRÁCTICA # 4</i>	130
6.3.5	<i>PRÁCTICA # 5</i>	142
6.3.6	<i>PRÁCTICA # 6</i>	146
6.3.7	<i>PRÁCTICA # 7</i>	151
7.	PROGRAMA DE OPERACIÓN DEL EQUIPO	156
7.1	Introducción	156
7.2	Manual de operaciones	156
7.3	Guía de laboratorio.....	157
7.4	Plan de mantenimiento.....	158
7.4.1	<i>Mantenimiento preventivo</i>	158
7.4.2	<i>Mantenimiento correctivo</i>	159
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	161
8.1	Conclusiones	161
8.2	Recomendaciones	162

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

PLANOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Dimensiones de los bancos de hielos comerciales.....	8
2 Rangos típicos de los números de Prandtl para fluidos comunes.....	15
3 Coeficiente global de transferencia de calor recomendado	32
4 Dimensiones del molde	48
5 Características intercambiador de calor.	56
6 Características de la unidad condensadora.....	58
7 Velocidades del gas refrigerante R-404A obtenido del fabricante.....	60
8 Diámetros recomendadas para el cálculo.....	60
9 Características del termostato.	60
10 Pérdidas por accesorios en la descarga.....	66
11 Pérdidas por accesorios en la descarga.....	70
12 Características de la bomba seleccionada	72
13 Dimensiones del tanque.....	74
14 Agitador de hélice	87
15 Características del controlador de temperatura	91
16 Especificación del sensor del nivel	92
17 Código ASME.....	99
18 Descripción de los elementos externos del tablero de control	117
19 Descripción de los elementos externos del tablero de control	117
20 Costo de mariales estructurales para tanque y estructura.....	118
21 Costo de mariales eléctricos y de control automático	119
22 Costo de equipos y materiales del sistema de recirculacion.....	120
23 Costos de materiales adicionales.....	120
24 Costo de mariales	121
25 Costo de envío y transporte	121
26 Costo de mano de obra.....	121
27 Costos directos	122
28 Costos indirectos.....	122
29 Costo total del equipo.....	122
30 Espesor de pared de hielo formado cada hora.....	126
31 Resultados de la práctica de descongelamiento.....	129
32 Datos de temperatura respecto al tiempo.....	131
33 Datos de la zona de enfriamiento rápido	140
34 Datos de la zona de enfriamiento lento	141
35 Datos de la zona de enfriamiento rápido	144

36	Datos de la zona de enfriamiento lento	144
37	Datos de la zona de enfriamiento rápido	145
38	Datos de la zona de enfriamiento rápido	148
39	Datos de la zona de enfriamiento lento	149
40	Datos de la zona de enfriamiento rápido	149
41	Datos de la zona de enfriamiento rápido	150
42	Datos de la zona de enfriamiento rápido	153
43	Datos de la zona de enfriamiento lento	153
44	Datos de la zona de enfriamiento rápido	154
45	Datos de la zona de enfriamiento rápido	155
46	Jerarquía de las actividades de mantenimiento preventivo.....	158
47	Operaciones de mantenimiento preventivo	158
48	Problemas operaciones, causas y soluciones	159

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1	Generador de hielo en bloques7
2	Conducción de calor a través de una pared grande de espesor Δx y área a9
3	Conducción en una pared plana.....12
4	Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural...12
5	Coefficiente global de transferencia de calor.....20
6	Esquema de transferencia de calor, analogía termica y electrica21
7	LMTD para fluidos paralelos.....23
8	LMTD para fluidos en contracorriente23
9	LMTD para fluidos con cambio de fase24
10	Sección transversal de la pared del tanque.....37
11	Resistencias térmicas44
12	Diferencia media logarítmica45
13	Diferencia media logarítmica tramo a-b.....45
14	Diferencia media logarítmica tramo b-c46
15	Resistencias térmicas50
16	Disposición de las paredes del tanque52
17	Área de transferencia de calor del intercambiador.57
18	Unidad condensadora seleccionada.....58
19	Válvula de expansión termo estática59
20	Termostato full gauge seleccionado.61
21	Presóstato incluido en la unidad de condensación seleccionada61
22	Esquema del sistema de bombeo.64
23	Esquema de la cabeza estática de succión.....68
24	Bomba centrífuga CHUGGER72
25	Relación longitud - altura.....75
26	Disposición y dimensiones del tanque.....76
27	Estudio de simulación del tanque.....78
28	Tensión de Von Mises tanque.....79
29	Desplazamiento estático resultante.....79
30	Deformación unitaria equivalente80
31	Vista deformada del tanque.....81
32	Dimensiones de la estructura82
33	Mallado de la estructura83
34	Tensión de Von Mises estructura84
35	Desplazamiento estático resultante - análisis estático: estructura85

36	Vista deformada de la estructura - análisis estático: estructura	85
37	Esquema del agitador	87
38	Dimensiones del agitador	88
39	Distribución de sensores en la matriz	89
40	TC-900Ri plus - controlador digital para refrigeración y deshielo.....	91
41	Sensor de nivel	92
42	Contactador LS Metasol mc-9b.....	93
43	Tipos de temporizadores hanyoung nux.....	94
44	Circuito de conexión del temporizador	94
45	Arduino uno.....	95
46	Presentación de los sensores	96
47	Descripción de los puertos del sensor	97
48	Esquema de los diferentes tipos de relés	98
49	Tanque de almacenamiento	102
50	Moldes	104
51	Montaje de los soportes de los moldes en el tanque	105
52	Ensamble tanque estructura.....	106
53	Diagrama del circuito de control	107
54	Diagrama de circuito de potencia	116
55	Elementos internos del tablero de control.....	116
56	Elementos externos del tablero de control.....	117
57	Puesta en marcha del equipo.....	123
58	Activación del cronometro	124
59	Etapas de enfriamiento de agua y generación de hielo	125
60	Detalle de medición de espesor de pared formado con el tiempo.....	126
61	Curvas de temperatura vs tiempo.....	127
62	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 1	133
63	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 2	134
64	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 3	134
65	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 4	135
66	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 5	135
67	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 6	136
68	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 7	136
69	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 8	137
70	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 9	137
71	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 10	138
72	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 11	138

73	Curva temperatura vs tiempo en el sensor 12	139
74	Regiones en las curvas temperatura vs tiempo	140
75	Regiones en las curvas temperatura vs tiempo	143
76	Regiones en las curvas temperatura vs tiempo	147
77	Regiones en las curvas temperatura vs tiempo	152

LISTA DE ABREVIACIONES

AISI	Instituto Americano de Fierro y Acero (siglas en inglés)
ANSI	Instituto Nacional Americano Estándar (siglas en inglés)
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
AWS	Sociedad Americana de Soldadura (siglas en inglés)
API	Interfaz de Programación de Aplicaciones (siglas en inglés)
LMTD	Diferencia de temperatura media logarítmica

SIMBOLOGÍA

A	Área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor	m ²
A _c	Área de la sección transversal	m ²
A _s	Área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección	m ²
C	Constante experimentalmente determinada	
C _o	Número de convección	
C _p	Calor específico del fluido	$\frac{J}{kg\ ^\circ C}$
D	Diámetro exterior del tubo	m
D _{int}	Diámetro interno de la tubería	m
F	Factor de corrección para bancos de tubos N < 16	
f	Factor de fricción	
G	Velocidad másica	$\frac{kg}{s * m^2}$
Gr	Número de Grashof	
G _e	Gravedad específica del líquido	
H	Altura del recipiente	m
h	Coeficiente de transferencia de calor por convección	$\frac{W}{m^2\ ^\circ C}$
h ₁	Coeficiente de transferencia de calor interna del tubo	$\frac{W}{m^2\ ^\circ C}$
h ₂	Coeficiente de transferencia de calor externa del tubo	$\frac{W}{m^2\ ^\circ C}$
k	Conductividad térmica del material	$\frac{w}{m\ ^\circ C}$
K _f	Conductividad térmica del fluido	$\frac{w}{m\ ^\circ C}$
L _c	Longitud característica	m
L _p	Espesor de la pared	m
L _R	Largo del recipiente	m
l	Luz de la viga	mm
m	Constante experimentalmente determinada	
n	Constante experimentalmente determinada	
Nu	Número de Nusselt	
P	Perímetro mojado	m
Pr	Número de Prandtl	
Q̇ _{cond}	Flujo de calor por conducción	W

Q_{conv}	Flujo de calor por conducción	W
q	Capacidad calorífica a transmitirse	W
q"	Velocidad neta de transferencia de calor desde la superficie expresada por unidad de área de la superficie	$\frac{W}{m^2}$
q_l	Calor latente	W
r	Radio de la superficie a considerar	m
r_1	Radio interior del tubo	m
r_2	Radio exterior del tubo	m
R_a	Número de Rayleigh	
$R_{conv 1}$	Resistencia térmica por convección en el punto 1	$\frac{^{\circ}C}{w}$
$R_{conv 2}$	Resistencia térmica por convección en el punto 2	$\frac{^{\circ}C}{w}$
Re	Número de Reynolds	
Re_D	Número de Reynolds definido en base de la velocidad máxima	
R_{pared}	Resistencia térmica por conducción en la pared	$\frac{^{\circ}C}{w}$
R_{Total}	Resistencia Térmica total	$\frac{^{\circ}C}{w}$
T_1	Temperatura de la superficie izquierda para $x=0$	$^{\circ}C$
T_2	Temperatura de la superficie derecha para $x=L$	$^{\circ}C$
T_e	Temperatura del fluido en la salida del banco	$^{\circ}C$
T_i	Temperatura del fluido en la admisión del banco	$^{\circ}C$
T_m	Temperatura media aritmética	$^{\circ}C$
T_s	Temperatura de la superficie	$^{\circ}C$
T_{∞}	Temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie	$^{\circ}C$
U	Coeficiente global de transferencia de calor	$\frac{w}{m^2 \text{ } ^{\circ}C}$
V	Velocidad del fluido	$\frac{m}{s}$
V_a	Velocidad aproximada de entrada del fluido	$\frac{m}{s}$
$V_{m\acute{a}x}$	Velocidad máxima	$\frac{m}{s}$
x	Calidad del fluido	
α	Difusividad térmica	$\frac{m^2}{s}$
α_1	Factor que depende de la relación de la longitud a la altura del tanque	

β	Coeficiente de expansión térmica	$\frac{1}{^{\circ}K}$
ρ	Densidad del fluido	$\frac{kg}{m^3}$
σ_y	Esfuerzo del acero inoxidable	kpsi
μ	Viscosidad dinámica del fluido	$\frac{kg}{m \cdot s}$
ν	Viscosidad cinemática	$\frac{m^2}{s}$
y	Flecha admisible	mm
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura	
ΔT_1	Diferencia de temperatura entre los dos fluidos en los extremos de entrada del intercambiador	$^{\circ}C$
ΔT_2	Diferencia de temperatura entre los dos fluidos en los extremos de salida del intercambiador	$^{\circ}C$

LISTA DE ANEXOS

- A Correlaciones empíricas para el número de Nusselt promedio
- B Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre las superficies
- C Propiedades del agua
- D Propiedades del cloruro de calcio
- E Diagrama de Moody
- F Longitud equivalente de accesorios
- G Datos de temperatura y tiempo adquiridos en el proceso de enfriamiento de agua "normal"
- H Graficas de las curvas Temperatura vs tiempo del proceso de enfriamiento de agua "normal"
- I Datos de temperatura y tiempo adquiridos en el proceso de formación de hielo a partir de agua ablandada
- J Graficas de las curvas Temperatura vs tiempo del proceso de formación de hielo a partir de agua ablandada
- K Datos de temperatura y tiempo adquiridos en el proceso de formación de hielo a partir de agua normal
- L Graficas de las curvas Temperatura vs tiempo del proceso de formación de hielo a partir de agua normal
- M Guía de laboratorio "Enfriamiento de agua"
- N Guía de laboratorio "Formación de hielo"

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se detalla el proceso de diseño, construcción y pruebas de un generador de hielo en bloques, con el fin de desarrollar prácticas de laboratorio, calcular la velocidad enfriamiento del agua, de formación de hielo.

El control del sistema se realiza mediante un controlador de temperatura para mantener la salmuera dentro del rango establecido; un sensor de nivel a fin de evitar los derrames y un sensor de temperatura para el final de formación de hielo. Para la adquisición de datos se elaboró una matriz con 12 sensores ubicados en las tres direcciones, comandados por un Arduino.

La capacidad del equipo es 10 kg, en dos moldes de 5 kg cada uno. Las pruebas se realizaron con agua ablandada y agua normal (de grifo) a diferentes temperaturas de la salmuera.

Las pruebas se realizaron varias veces obteniendo datos diferentes, pero curvas similares, donde se puede notar zonas con características muy diferentes una de otra. Es así que en el enfriamiento de agua normal se halló tres zonas y con agua ablandada dos zonas. En la formación de hielo tanto con agua normal como agua ablandada su comportamiento determina cuatro zonas, las que se pueden mencionar como: fase de enfriamiento, fase de cambio de estado, fase de sub enfriamiento y fase de equilibrio; en cada una de ellas variando las velocidades del proceso.

El enfriamiento de agua normal respecto al agua ablandada es un 30% más rápida, existiendo en ambos casos un enfriamiento rápido que dura alrededor de 10 minutos, con una velocidad promedio de $1,379 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \pm 10\%$.

En la formación de hielo se puede notar que a partir del agua normal se obtiene hielo un 9,26% más rápido que con agua ablandada, pero afectando su resistencia. La velocidad de formación promedio del hielo es de 0,5556 kg/h.

ABSTRACT

In this thesis the process of design, construction and testing of a block ice machine is detailed in order to develop laboratory practices, and calculate the speed of water cooling and ice formation speed.

The system control is performed by a temperature controller to maintain the brine solution within the established range; a level sensor to avoid spills and a temperature sensor for the end of ice formation. A matrix with 12 sensors in all three directions was made for data acquisition led by an Arduino.

The equipment capacity is 10 kg, distributed in two molds of 5 kg each one. The tests were conducted with softened water and normal water (from the tap) at different temperatures from brine solution.

The tests were conducted repeatedly obtaining different data, but similar curves, where zones with characteristics very different from each other can be noticed. That is why three zones were found in the normal water cooling, and two zones with softened water. In the ice formation as well as with normal water as with softened water, its behavior determines four zones, which are mentioned as: cooling phase, change of state phase, sub cooling phase and balance phase; in each one of them varying the process speeds.

The normal water cooling related to the softened water is 30% faster, existing in both cases a fast cooling that lasts around 10 minutes, with an average speed of $1,379\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 10\%$.

In the ice formation can be noticed that from the normal water is obtained ice a 9,26% faster than with softened water, but affecting its strength. The ice average formation speed is of $0,5556\text{ kg/h}$

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la actualidad existen diversos equipos de refrigeración y conservación de alimentos, en su mayoría son domiciliarios, pero en la industria también se la utiliza, sobre todo en la producción de alimentos procesados, industria pesquera, entre otros. Estos equipos dependiendo de la capacidad frigorífica varía su costo y su volumen por lo cual en muchos casos no se tienen los recursos y es necesario otra solución.

A partir de esta problemática aparecieron las plantas de producción de hielo en sus diversas presentaciones, con el suficiente espacio para producción y almacenamiento satisfaciendo así un amplio mercado, sobre todo en la zona costera, tanto para lo que es para barcos pesqueros, como para puertos de comercialización de estos productos y para enfriar bebidas en los puntos turísticos.

En nuestro país estas plantas de producción de hielo han reemplazado a los antiguos hieleros (Baltasar Ushca, un quichua de 64 años, es conocido como el último hielero del Chimborazo.) que abastecían de hielo extraído de los nevados a los diversos mercados de las serranía sobre todo.

El beneficio de utilizar el generador de hielo en bloques de producción en serie, es que en la actualidad estas son las necesidades que se presentan en las industrias de alimentos, en barcos y puertos pesqueros; a fin de reducir costos de producción, espacio y tiempo, al contar con un producto ya elaborado en el momento que se lo desee usar.

En el mercado actual existen varias empresas que construyen este tipo de máquinas con costos que van desde los 5000 a 20000 dólares dependiendo de su capacidad, los principales proveedores de estas máquinas se encuentran en China.

1.2 Justificación

Con el fin de ahorrar energía y optimizar los procesos que se dan alrededor de la conservación y transporte de alimentos especialmente en puertos y embarcaciones

pesqueras, plazas y zonas de alto consumo de bebidas frías, es necesario analizar alternativas de mayor eficiencia y producción que los equipos convencionales.

Tomando en cuenta lo que se ha dicho anteriormente, se escogió el presente tema con el propósito de diseñar y construir un generador de hielo en bloques para laboratorio, que trabaje de manera eficiente, con un mínimo de consumo de energía, en un tiempo reducido.

Además al construir un generador de hielo en bloques podemos poner en práctica las normas de producción de hielo para uso alimenticio, dureza de hielo y tiempos de producción.

Con respecto a la utilidad que se le puede dar a nivel de laboratorio, se considera la realización de investigaciones y prácticas de laboratorio sobre:

Velocidad de enfriamiento del agua con respecto al tiempo.

Velocidad de formación de hielo con respecto al tiempo.

Análisis de la transferencia de calor con cambio de fase.

Entre otros.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Diseñar y construir un generador de hielo en bloque para el Laboratorio de Refrigeración de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

Analizar los conceptos teóricos necesarios para diseñar y construir el generador de hielo en bloques.

Realizar la construcción y montaje del sistema de generación de hielo.

Obtener datos experimentales de enfriamiento del agua y formación de hielo.

Calcular las velocidades de enfriamiento de agua y de formación de hielo

Realizar pruebas de funcionamiento del generador de hielo para determinar su funcionalidad, crear un plan de mantenimiento del equipo y una guía de prácticas de laboratorio. Analizar los costos directos e indirectos resultados de la realización del proyecto.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Hielo, producción y aplicaciones

2.1.1 Introducción. Han transcurrido 230 años desde los primeros experimentos realizados por el escocés William Cullen para conseguir hielo a través de evaporación de éter como refrigerante, y a partir de estos experimentos se desarrollaron muchos más hasta que en el año 1931 Thomas Midgley revolucionó el método de refrigeración al conseguir gas freón, básico hasta hace poco para los frigoríficos y los aires acondicionados

Una de las ventajas de la refrigeración con hielo se presenta especialmente en los vegetales o en los productos que tienden a perder masa (debido a la deshidratación) y llegan a ser menos atractivos en apariencia, además que es económico de producirse para algunas aplicaciones entre estas tenemos: productos marinos, aves procesamiento de vegetales frescos, para banquetes y fiestas, el negocio de los químicos, del concreto, además de ventas y la industria de venta de alimentos.

En la actualidad existen diversos tipos de máquinas o equipos para la producción de hielo en serie, entre las cuales se puede notar las siguientes: hielo en bloques de fabricación rápida, hielo en bloques por inmersión, hielo en escamas, hielo en tubos, hielo en placas, hielo fundente, entre otras. Estos equipos dependen del mercado al cual está destinado el producto final.

2.2 Generador de hielo

2.2.1 Definición. Se puede definir como la máquina capaz extraer el calor y llevar al agua a su punto de congelación e incluso descender más para mantenerlo en ese estado, su funcionamiento se basa en el ciclo de Carnot.

El ciclo de Carnot consiste en el traslado de energía calorífica de una cámara de refrigeración al ambiente o exterior, utilizando una serie de conductos con un gas, que eleva su temperatura a base de compresión en el exterior de la cámara, haciendo posible disipar el calor al ambiente exterior. Una vez enfriado, el gas comprimido se le retorna a una cámara de expansión situada en el interior de la zona de refrigeración, y

al bajar su temperatura, absorbe energía calorífica de la cámara, enfriándola. (COSMOS, 2015)

Una máquina de hielo típica consiste en un sistema de refrigeración, un sistema de alimentación de agua, carcasa y aislamiento.

2.2.2 *Subsistemas principales.* Una máquina de hielo tiene dos subsistemas principales: el sistema de refrigeración y el sistema de suministro/circulación/purgado de vapor de refrigerante para producir la refrigeración necesaria en la producción de hielo.

Las máquinas de hielo usan condensadores refrigerados por agua o refrigerados por aire. Alrededor del 80 % de las máquinas de hielo tienen condensadores refrigerados por aire. (COFRICO, 2009)

Los componentes del sistema de refrigeración incluyen:

Compresor.- Típicamente recíprocos convencionales con capacidades entre 1/3 y 3 hp, dependiendo de la capacidad de la máquina.

Condensador.- Intercambiador de calor de tubos concéntricos refrigerados por agua o tubos de aletas refrigerados con aire. Los condensadores de agua fría están diseñados de forma que la temperatura de condensación está $- 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $- 4^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura ambiente. Estos condensadores están controlados para mantener una temperatura de condensación preseleccionada constante variando los caudales de agua.

Dispositivos de expansión.- Válvulas de expansión termostáticas y tubos capilares.

Evaporador.- Típicamente el diseño consiste en tubos de cobre fijados a superficies aletadas de aluminio o cobre.

Intercambiadores de calor de la línea de succión/línea de líquido.

Tuberías de refrigerantes y líneas de bypass de gas caliente.

Válvula de solenoide de gas caliente.-Controla el flujo de refrigerante al condensador durante la producción de hielo y al evaporador durante la producción de hielo.

El refrigerante R-404A.- Es el refrigerante principal usado en todas las máquinas de hielo hoy en día. R-134A y R-22 todavía se usan en unos pocos modelos seleccionados, aunque este último debido a los recientes cambios en la normativa, tiene los días contados, por su contenido de sustancias tóxicas y altamente contaminantes para el ambiente. (COFRICO, 2009)

2.3 Generador de hielo en bloque

La máquina de hielo en bloques tradicional fabrica el hielo en moldes que se sumergen en un tanque con refrigerante secundario; por lo general salmuera, glicol u otro, en circulación. Las dimensiones de los moldes y la temperatura del refrigerante se seleccionan habitualmente de manera que el período de congelación dure entre 8 y 24 horas.

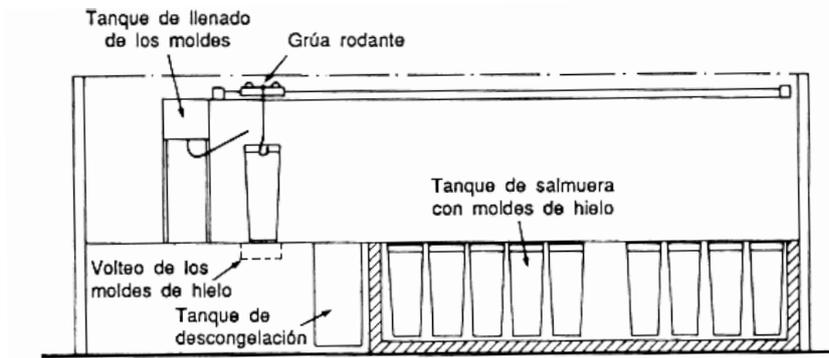
La congelación demasiado rápida produce hielo quebradizo. El peso del bloque puede oscilar entre 12 y 150 kg, con arreglo a las necesidades; se considera que el bloque de 150 kg es el mayor que un hombre puede manipular adecuadamente. Cuanto más grueso sea el bloque de hielo, más largo será el tiempo de congelación. Este tipo de planta suele exigir una atención continua, por lo que se trabaja con un sistema de turnos.

Las fábricas de hielo en bloques requieren abundante espacio y mano de obra para manipular el hielo. Este último factor ha impulsado fuertemente el desarrollo de equipo automático moderno para la fabricación de hielo.

El hielo en bloques aún se utiliza y puede ofrecer ventajas con respecto a otras formas de hielo en los países tropicales. El almacenamiento, manipulación y transporte se simplifican si el hielo está en forma de grandes bloques; y la simplificación suele ser imperativa en las pesquerías a pequeña escala y en los sitios relativamente remotos.

Con ayuda de un buen triturador de hielo, los bloques pueden reducirse a partículas del tamaño que se desee, pero la uniformidad de tamaño será menor que la que se logra con otros tipos de hielo. En algunas circunstancias, los bloques pueden fragmentarse también machacándolos a mano. (FAO, 1993)

Figura 1. Generador de hielo en bloques



Fuente: <http://www.fao.org/docrep/003/t0713s/T0713S05.htm>

2.3.1 Aplicación. La principal aplicación que se le da a los generadores de este tipo son:

- Conservación de productos enlatados.
- Enfriamiento de líquidos, bebidas gaseosas y/o cerveza en botellas principalmente.
- En procesos productivos, para el control de temperatura de equipos o en el proceso en sí.
- Control de Temperatura de piscinas, criaderos o peceras.
- Conservación de pescado y/o carnes de diversos tipos.
- Además de las exposiciones artísticas, con lo cual los escultores profesionales hacen uso de los bloques de hielo para mostrar su aptitud para crear esculturas extraordinarias.

2.3.2 Ventajas. Las principales ventajas de estos generadores frente a otros generadores son:

- El almacenamiento, la manipulación y el transporte son sencillos y fáciles.

- La tasa de fusión es relativamente baja, por lo que las pérdidas durante el almacenamiento y la distribución son mínimas.
- El hielo es compacto, por lo que se necesita menos espacio de almacenamiento.
- El hielo se puede reducir a partículas de cualquier tamaño necesario, mediante su trituración antes de usarlo.
- La máquina es de diseño robusto y su mantenimiento es sencillo para un ingeniero mecánico competente.
- El hielo puede ser manipulado con facilidad y vendido por bloque.

2.3.3 *Diseño y dimensiones.* Su diseño es compacto para un fácil transporte y mantenimiento, las dimensiones de estos generadores de hielo dependen de la empresa fabricante de la máquina, la capacidad de producción y del tamaño del bloque, una muestra de dimensiones de los bloques según la empresa SNOWKEY ICE SYSTEMS son:

Tabla 1. Dimensiones de los bancos de hielos comerciales

Peso (kg)	L (mm)	W (mm)	H (mm)
12.5	140	125	800
20	250	125	800
25	300	125	800
50	440	180	800
75	450	190	900
100	470	240	900
125	520	280	900

Fuente: <http://www.icemachine-cn.es/5-block-ice-machine.html>

2.3.4 *Funcionamiento, generación y almacenamiento del hielo.* La fabricación consiste en rellenar moldes de metal con agua y sumergirlos en un baño de salmuera refrigerada a una temperatura muy inferior a la de congelación del agua. Generalmente se utiliza para ello cloruro sódico o cálcico. Las dimensiones de los moldes y la temperatura de la salmuera se seleccionan para que el periodo de congelación dure entre 8 y 24 horas. La congelación demasiado rápida produce hielo quebradizo.

Después de la congelación, Una grúa levanta una fila de moldes y los transporta a un tanque de descongelación donde los sumerge en agua para que el hielo se desprenda. Los moldes se voltean para que salgan los bloques, se rellenan de nuevo con agua dulce y se colocan nuevamente en el tanque de salmuera. Se trata de una operación discontinua, por lo que necesita mano de obra para una atención continua de todas las operaciones. Una planta de 100 t/día necesita normalmente entre 10 y 15 trabajadores (TAIWANTRADE, 2014)

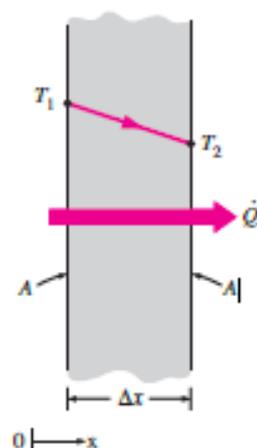
El almacenamiento se lo realiza en cámaras de conservación apilados uno encima del otro, esta es una de las ventajas del hielo en bloques, es que no se unen a otros en el almacenamiento y si lo hacen es fácil separarlos. Además de la poca pérdida del producto.

2.4 Conceptos de transferencia de calor.

Se puede definir a la transferencia de calor como el proceso por el que se intercambia energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, o también entre distintas partes de un mismo cuerpo que están a diferente temperatura.

La transferencia de calor se da mediante conducción, convección, o radiación . Aunque se puede dar el caso de que los tres procesos tengan lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de ellos predomine sobre los otros dos. Para el caso de estudio de generación de hielo, se hace necesario el estudio de la convección de forma natural, convección forzada, y convección en las paredes de los moldes y posteriores capas de hielo.

Figura 2. Conducción de calor a través de una pared grande de espesor Δx y área A



Fuente: Autores

2.4.1 Conducción de calor. La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energética de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas.

La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que está hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él. (CENGEL., 2011 pág. 17)

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta x = L$ y área A , como se muestra en la figura 5. La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$.

Los experimentos han demostrado que la razón de la transferencia de calor, Q , a través de la pared se duplica cuando se duplica la diferencia de temperatura ΔT de uno a otro lado de ella, o bien, se duplica el área A perpendicular a la dirección de la transferencia de calor; pero se reduce a la mitad cuando se duplica el espesor L de la pared.

Por lo tanto, se concluye que la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa; es decir,

$$\text{Razón de conducción del calor} = \frac{\text{Área} * \text{Diferencia de temperatura}}{\text{Espesor}}$$

O bien,

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W)$$

Donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación que acaba de darse se reduce a la forma diferencial, la cual se llama

ley de Fourier de la conducción del calor, en honor de J. Fourier, quien la expresó por primera vez en su texto sobre transferencia de calor en 1822.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (1)$$

Dónde:

\dot{Q}_{cond}	Flujo de calor por conducción, en W.
k	Conductividad térmica del material, en $\frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$.
A	Área perpendicular a la dirección de la transferencia de calor, en m ² .
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura.

El signo negativo en la ecuación 1 garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva. El área A de transferencia de calor siempre es normal (o perpendicular) a la dirección de esa transferencia.

2.4.1.1 *Conducción en una pared plana.* Cuando las superficies de la pared se encuentran a temperaturas diferentes, el calor fluye sólo en dirección perpendicular (figura 3) a las superficies.

Aplicando la ley de Fourier se obtiene:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k A \frac{(T_2 - T_1)}{L} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L}{kA}} \quad (\text{W}) \quad (2)$$

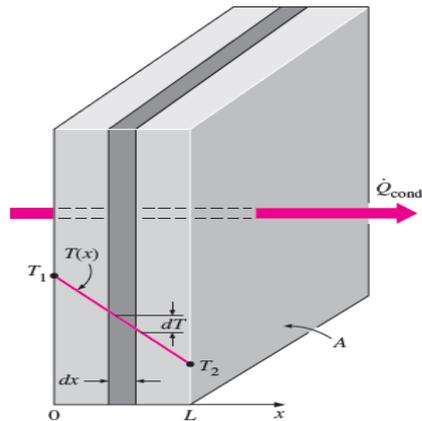
Dónde:

T_1 =	Temperatura de la superficie izquierda, en °C para x=0.
T_2 =	Temperatura de la superficie derecha, en °C para x=L.
L_p =	Espesor de la pared en, m.

Considerando a la transmisión de calor por conducción análoga al flujo de electricidad, la ecuación 2 se puede escribir en forma semejante a la ley de Ohm, basado en el siguiente parámetro

$$Q = \frac{\text{Potencial térmico}}{\text{Resistencia térmica}} = \frac{\Delta T}{R_k} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{L}{kA}} \quad (3)$$

Figura 3. Conducción en una pared plana

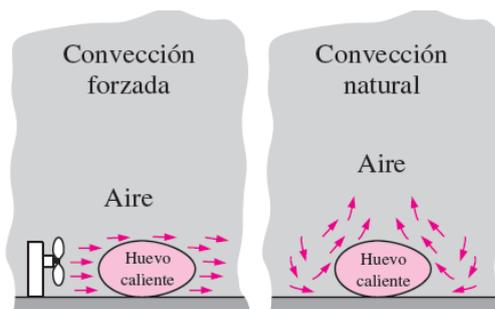


Fuente: YUNUS A. CENGEL - Transferencia de Calor y Masa, pág. 137

2.4.2 *Fundamentos de la convección.* La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido (figura 4).

Figura 4. Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural



Fuente: YUNUS A. CENGEL - Transferencia de Calor y Masa, pág. 26

Los procesos de transferencia de calor que comprenden cambio de fase de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso, como la elevación de las burbujas de vapor durante la ebullición o la caída de las gotitas de líquido durante la condensación.

La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como: (CENGEL., 2011 pág. 25)

$$Q_{\text{conv}} = h\dot{A}(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Dónde:

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección, en $\frac{W}{m^2\text{°C}}$.

A = Área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, en m^2 .

T_s = Temperatura de la superficie, en $^{\circ}\text{C}$.

T_∞ = Temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie, en $^{\circ}\text{C}$.

2.4.2.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección. El coeficiente de transferencia de calor por convección, no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y su valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. (CENGEL., 2011 pág. 26)

Existen varios métodos para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección:

- Análisis dimensional combinado con experimentos.
- Soluciones matemáticas exactas de las ecuaciones de capa de frontera.
- Análisis aproximado de la capa de frontera por métodos integrales.
- Analogía entre transferencia de calor, transferencia de masa y transferencia de cantidad de movimiento.

Para mayor explicación acerca de cada uno de los métodos de cálculo refiérase al libro, Apuntes de Transferencia de Calor. M.R. Valenzuela, Septiembre 2013.

Número de Nusselt. Es el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección concebido por Wilhelm Nusselt, el cual representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa.

Entre mayor sea el número de Nusselt, más eficaz es la convección. Un número de Nusselt de $Nu = 1$ para una capa de fluido representa transferencia de calor a través de ésta por conducción pura. (CENGEL., 2011 pág. 376)

Está definido como:

$$Nu = \frac{hL_c}{K_f} \quad (5)$$

Dónde:

$Nu =$ Número de Nusselt.

$h =$ Coeficiente de transferencia de calor, en $\frac{W}{m^2 \cdot C}$.

$L_c =$ Longitud característica, en m.

$k_f =$ Conductividad térmica del fluido, en $\frac{W}{m \cdot C}$.

Existen muchas correlaciones empíricas expresadas en términos del número de Nusselt para placas planas, cilindros, interior de tuberías, etc., que evalúan generalmente el número de Nusselt medio en una superficie.

Estas correlaciones tienen la forma:

$Nu = f$ (número de Reynolds o número de Rayleigh, número de Prandtl)

Número de Prandtl. Es un número adimensional, que va en proporción al cociente entre la difusividad de momento, conocida como viscosidad y la difusividad térmica.

Se considera también como la mejor manera de describir el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica. Su nombre se debe a Ludwig Prandtl, quien introdujo el concepto de capa límite en 1904 (CENGEL., 2011 pág. 384)

Está definido como:

$$Pr = \frac{\text{difusividad molecular de la cantidad de momento}}{\text{difusividad molecular del calor}} = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (6)$$

Dónde:

Pr = Número de Prandtl.

ν = Viscosidad cinemática, en $\frac{m^2}{s}$.

α = Difusividad térmica, en $\frac{m^2}{s}$.

μ = Viscosidad dinámica del fluido, en $\frac{Kg}{m \cdot s}$.

C_p = Calor específico del fluido, en $\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}$.

k = Conductividad térmica del fluido, en $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$.

En la siguiente tabla se pueden ver algunos rangos típicos de números de Prandtl para fluidos comunes.

Tabla 2. Rangos típicos de los números de Prandtl para fluidos comunes

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

Fuente: YUNUS A. CENGEL - Transferencia de Calor y Masa, pág. 384

Número de Reynolds. Es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido. Su nombre se debe a Osborn Reynolds quien descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas en el fluido (en la década de 1880). Esta razón se conoce como número de Reynolds.

Está definido para flujo externo como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V L_c}{\mu} \quad (7)$$

Dónde:

$Re =$ Número de Reynolds.

$\rho =$ Densidad del fluido, en $\frac{Kg}{m^3}$.

$V =$ Velocidad del fluido, en $\frac{m}{s}$.

$L_c =$ Longitud característica, en m.

$\mu =$ Viscosidad dinámica del fluido, en $\frac{Kg}{m \cdot s}$.

Para una placa plana, la longitud característica es la distancia x desde el borde de ataque, en tuberías circulares es igual al diámetro. (CENGEL., 2011 pág. 385)

En tuberías no circulares la longitud característica es equivalente al diámetro hidráulico:

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (8)$$

Dónde:

$A_c =$ Área de la sección transversal, en m^2 .

$P =$ Perímetro mojado, en m.

Número de Grashof. Es un número adimensional que representa los efectos de la convección natural y representa la razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúan sobre un fluido. Se llama así en honor al ingeniero alemán Franz Grashof.

Esta definido por:

$$Gr = \frac{g \beta}{\gamma^2} (T_s - T_\infty) L^3 \quad (9)$$

Dónde:

g Aceleración de la gravedad, en $\frac{m}{s^2}$.

β Coeficiente de expansión térmica, en $\frac{1}{^\circ K}$.

T_s	Temperatura de la superficie, en °C.
T_∞	Temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie, en °C.
L_c	Longitud característica, en m.
ν	viscosidad cinemática, en $\frac{m^2}{s}$.

Las propiedades físicas del fluido (Pr , ν , α y β) se deben evaluar a temperatura de la capa límite también llamada fílmica definida por:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (10)$$

El coeficiente de expansión térmica es inversamente proporcional a la temperatura fílmica representándose con la siguiente ecuación:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) = \frac{1}{T_f} \quad (11)$$

Para los gases ideales el valor de β es:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (12)$$

Dónde:

T = Temperatura absoluta, en °C.

El papel que desempeña el número de Reynolds en la convección forzada es realizado por el número de Grashof en la convección natural. Como tal, este último número proporciona el criterio principal en la determinación de si el flujo del fluido es laminar o turbulento en la convección natural. (CENGEL., 2011 pág. 526)

Número de Rayleigh. El número de Rayleigh es considerado como el razón de la flotabilidad y los productos de las difusividad térmica y de cantidad de movimiento, es decir, es el resultado del producto del número de Grashof y el número de Prandtl. Su nombre debe a Lord Rayleigh. Para el caso de convección natural en una pared vertical el número de Rayleigh se define como:

$$R_a = Gr * Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad (13)$$

Dónde:

α = difusividad térmica, en $1/^\circ\text{C}$.

Generalmente, la convección comienza para valores del número de Rayleigh mayores de mil, $Ra > 1000$, mientras que para $Ra < 10$ la transferencia de calor es completamente por conducción. (CENGEL., 2011 pág. 527)

2.4.2.2 Relaciones empíricas para la transferencia de calor. Para propósitos de diseño e ingeniería las correlaciones empíricas son casi siempre de utilidad práctica, en este caso, estas son el resultado de métodos experimentales realizados con el fin de encontrar el coeficiente h , a continuación se presentan algunas ecuaciones en función del número de Nusselt.

Convección forzada en superficies interiores. En las aplicaciones de calentamiento y enfriamiento, es común el uso del flujo de líquido o gas a través de tubos y ductos. En ellas, se fuerza al fluido a desplazarse por medio de un ventilador o bomba por un tramo de tubo o ducto que es suficientemente largo como para realizar la transferencia deseada de calor.

La ecuación de semejanza para la convección forzada tiene la forma:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (14)$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds, determina la similitud hidromecánica entre las corrientes de los agentes portadores de calor.

Pr = Número de Prandtl, es la característica termofísica del agente portador de calor.

Para tubos pulidos con flujo turbulento completamente desarrollado, Dittus y Boelter recomiendan la siguiente relación:

$$Nu_d = 0,023 * Re_d^{0,8} * Pr^n \quad (15)$$

En esta ecuación las propiedades se evalúan a la temperatura global del fluido y el exponente n tiene los siguientes valores: (CENGEL., 2011 pág. 488)

$$n = \begin{cases} 0,4 & \text{para calentamiento} \\ 0,3 & \text{para enfreamiento} \end{cases}$$

Convección forzada sobre superficies exteriores. El número de Nusselt promedio para cilindros largos cuyo eje es perpendicular a la corriente de un fluido se puede expresar en forma compacta como:

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRe^m Pr^n \quad (16)$$

Dónde:

D longitud característica, en m.

n, C, m constantes experimentalmente determinadas. (ANEXO A)

Las relaciones para los cilindros antes dadas son para un solo cilindro o para cilindros orientados de tal forma que el flujo sobre ellos no resulte afectado por la presencia de otros. Asimismo, son aplicables a superficies lisas. (CENGEL., 2011 pág. 434)

En los bancos de tubos las características del flujo son dominadas por la velocidad máxima $V_{m\acute{a}x}$ que se tiene dentro del banco más que por la velocidad aproximada V . Por lo tanto, el número de Reynolds se define sobre la base de la velocidad máxima como:

$$Re_D = \frac{\rho V_{m\acute{a}x} D}{\mu} = \frac{V_{m\acute{a}x} D}{\gamma} \quad (17)$$

Convección natural sobre superficies exteriores. Es cuando el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido. Por ejemplo, en ausencia de un ventilador, la transferencia de calor, cualquier movimiento en el aire se deberá a la elevación del aire más caliente (y, por lo tanto, más ligero) cercano a la superficie y la caída del más frío (y, por lo tanto, más pesado) para llenar su lugar (VALENZUELA, 2003 pág. 53)

Puesto que sobre las partículas calientes actúa una fuerza de sustentación o fuerza de empuje de Arquímedes, es precisamente esa fuerza la que provoca el movimiento de convección del fluido, esta fuerza será mayor, cuando la diferencia de temperatura entre los medios sea también grande.

Las correlaciones empíricas sencillas para el número promedio de Nusselt, Nu, en la convección natural son de la forma: (CENGEL., 2011 pág. 527)

$$\text{Nu} = \frac{hL_c}{k} = C(\text{GrPr})^n = C\text{Ra}^n \quad (18)$$

Los valores de las constantes C y n dependen de la configuración geométrica de la superficie y del régimen de flujo, el cual se caracteriza por el rango del número de Rayleigh. En la tabla 6 se encuentran relaciones simples para el cálculo del número promedio de Nusselt para varias configuraciones geométricas.

Para una placa plana vertical, la longitud característica es la altura L de ella. En el ANEXO B se dan tres relaciones para el número promedio de Nusselt en una placa vertical isotérmica. Las dos primeras relaciones son muy sencillas. A pesar de su complejidad, sugerimos el uso de la tercera (ecuación 9-21), recomendada por Churchill y Chu (1975), dado que es aplicable sobre todo el rango del número de Rayleigh. (HOLMAN, 1999 pág. 309)

Es de la forma:

$$\text{Nu} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387\text{Ra}^{1/6}}{\left[1 + (0.492/\text{Pr})^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{para } 10^{-1} < \text{Ra} < 10^9 \quad (19)$$

2.4.2.3 Coeficiente global de transferencia de calor (U). Se lo define como la intensidad total de transferencia de calor a través de un material. Suele utilizarse en los cálculos de transferencia de calor con intercambiadores de calor. También se utiliza en cálculos de transferencia de calor a través de ventanas y es conocido como factor-U. Expresado en W/m²

Figura 5. Coeficiente global de transferencia de calor

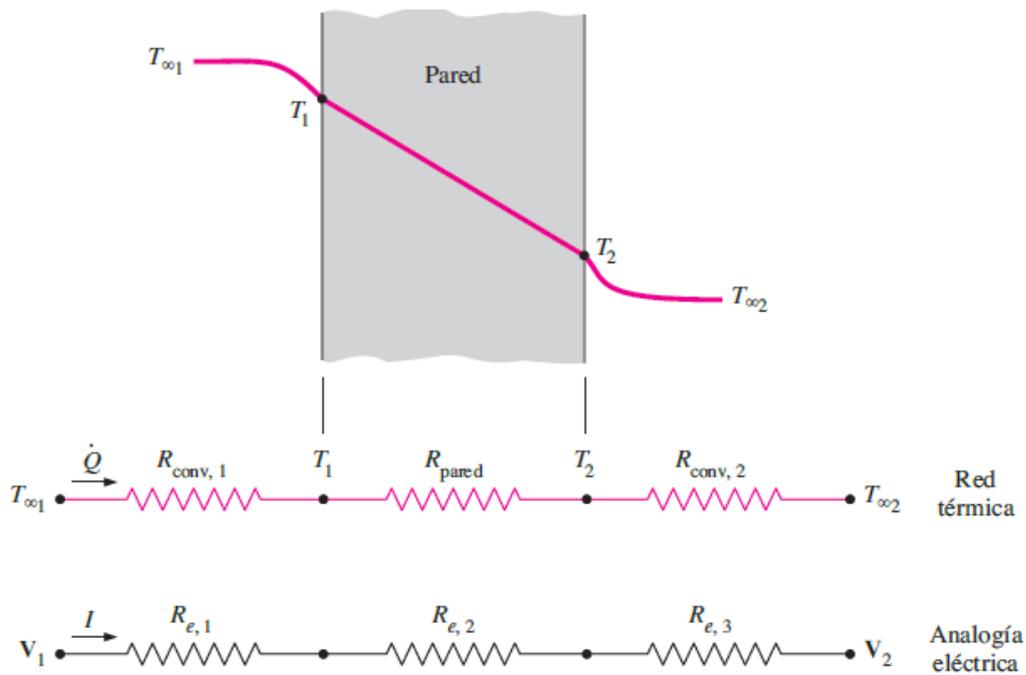


$$R_{total} = \frac{1}{U A}$$

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/47380156/Coeficiente-global-de-transferencia-de-calor>

Considere ahora la transferencia de calor unidimensional en estado estacionario a través de una pared plana de espesor L , área A y conductividad térmica k que está expuesta a la convección sobre ambos lados hacia fluidos a las temperaturas $T_{\infty 1}$ y $T_{\infty 2}$, con coeficientes de transferencia de calor h_1 y h_2 . (Figura 6).

Figura 6. Esquema de transferencia de calor, analogía térmica y eléctrica



Fuente: YUNUS A. CENGEL - Transferencia de Calor y Masa, pág. 139

En condiciones estacionarias, se tiene:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{convección de calor} \\ \text{hacia la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{conducción de calor} \\ \text{a través de la pared} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Razón de la} \\ \text{convección de calor} \\ \text{desde la pared} \end{array} \right)$$

$$\dot{Q} = h_1 A (T_{\infty 1} - T_1) = kA \frac{T_1 - T_2}{L} = h_2 A (T_2 - T_{\infty 2}) \quad (20)$$

La expresión puede acomodarse de la siguiente forma:

$$\dot{Q} = \frac{(T_{\infty 1} - T_1)}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{kA}} = \frac{(T_2 - T_{\infty 2})}{\frac{1}{h_2 A}} \quad (21)$$

$$\dot{Q} = \frac{(T_{\infty 1} - T_1)}{R_{conv 1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} = \frac{(T_2 - T_{\infty 2})}{R_{conv 2}} \quad (22)$$

Como las resistencias térmicas están en serie, la resistencia térmica equivalente se determina sumando cada una de las resistencias.

$$\dot{Q} = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{\text{Total}}} = \frac{\Delta T}{R} \quad (W) \quad (23)$$

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{conv 1}} + R_{\text{pared}} + R_{\text{conv 2}} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad \left(\frac{^\circ\text{C}}{W}\right) \quad (24)$$

$$UA = \frac{1}{R_{\text{total}}} \quad (W/^\circ\text{C}) \quad (25)$$

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad (26)$$

Por lo tanto, para una unidad de área, el coeficiente de transferencia de calor total es igual al inverso de la resistencia térmica total. (CENGEL, 2011, pág. 139)

2.4.2.4 Método de la diferencia de la temperatura media logarítmica. Es la forma apropiada de la diferencia de temperatura promedio que debe usarse en el análisis de los intercambiadores de calor, debido a que se obtiene siguiendo el perfil real de temperaturas de los fluidos a lo largo del intercambiador y es una representación exacta de la diferencia de temperatura promedio entre los fluidos caliente y frío.

Así la ecuación 26 puede expresarse de la siguiente forma:

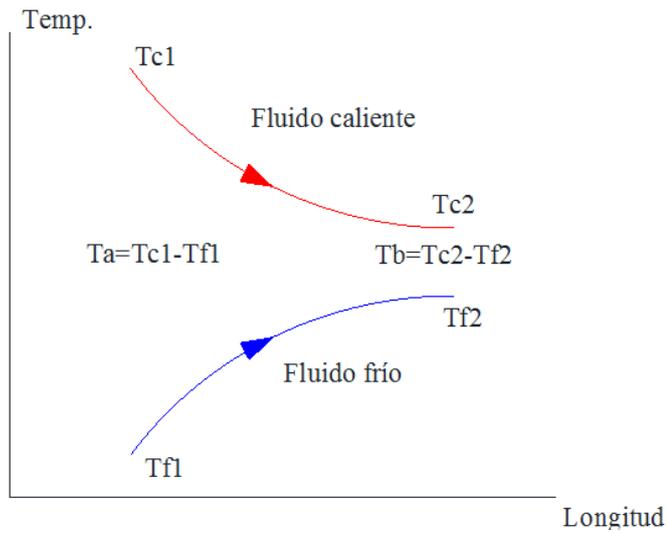
$$Q = AUF(LMTD) \quad (27)$$

La diferencia de la temperatura media logarítmica conocido también como LMTD por sus siglas en inglés, es un gráfico que nos ayuda a entender cómo se va transfiriendo el calor del cuerpo caliente al frío. Se emplea como un índice de cambio de temperatura de las sustancias cuando ésta no es constante.

Los fluidos pueden fluir de forma paralela o de forma contraria dentro de un intercambiador de calor como se indica en la Figura 7.

En el caso de fluidos paralelos, ambos entran por una misma sección de tubería, sus temperaturas se van acercando la una a la otra a medida que salen del intercambiador de calor.

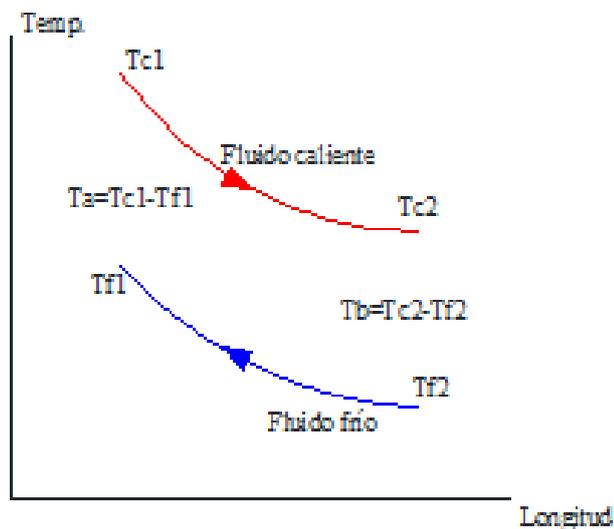
Figura 7. LMTD para fluidos paralelos



Fuente: Autores.

Para el caso de fluidos en contracorriente se observa la Figura 8. El fluido calentado entra por la parte derecha y sale por la izquierda. Al contrario del caso anterior la transferencia de calor se produce entre los fluidos en el momento en que cada uno se encuentra en su estado de menor temperatura, por ésta razón es que tiende a conservar energía disponible y posibilita alcanzar una temperatura final superior en el fluido que se calienta.

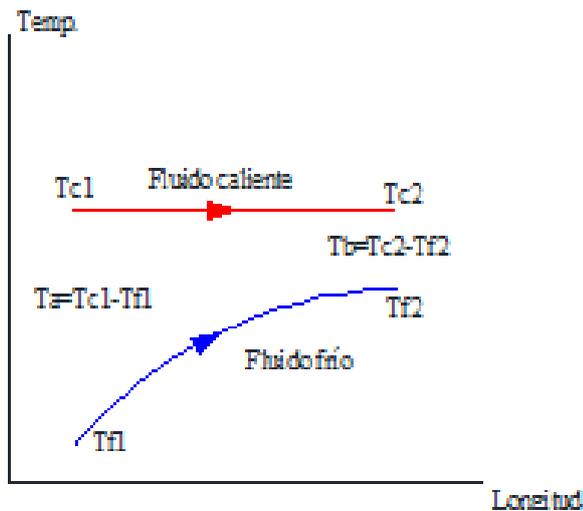
Figura 8. LMTD para fluidos en contracorriente



Fuente: Autores.

Para fluidos con cambio de fase se tiene que tomar en cuenta el calor latente necesario para su cambio de fase, mientras que el fluido que es calentado sube su calor sensible durante el intercambio de calor, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. LMTD para fluidos con cambio de fase



Fuente: Autores

En todos los casos anteriores la diferencia media logarítmica de temperaturas se calcula de la misma manera. (CENGEL., 2011 pág. 476)

$$LMTD = \frac{T_b - T_a}{\ln\left(\frac{T_b}{T_a}\right)} \quad (28)$$

2.4.2.5 Calor latente. La energía interna también se asocia con las fuerzas que ejercen entre sí las moléculas de un sistema. Estas fuerzas ligan a las moléculas mutuamente y, como sería de esperar, son más fuertes en los sólidos y más débiles en los gases.

Si se agrega energía suficiente a las moléculas de un sólido o de un líquido, vencerán estas fuerzas moleculares y, simplemente, se separarán pasando el sistema a ser gas. Éste es un proceso de cambio de fase y, debido a esta energía agregada, un sistema en fase gaseosa se encuentra en un nivel más alto de energía interna que si estuviera en fase sólida o líquida. La energía interna asociada con la fase de un sistema se llama energía latente o calor latente. (CENGEL., 2011 pág. 7)

Es igual a la masa de calor latente a la presión y temperatura del proceso.

$$q = m_v h_{fg} \quad (29)$$

El calor latente del agua es:

De fusión: 334,4 kJ/kg (79,9 Kcal/kg) a 0 °C.

De evaporación: 2257 kJ/kg (539 Kcal/kg) a 100 °C.

2.4.3 *Sistema de control.* La Ingeniería de control es una disciplina que se focaliza en modelizar matemáticamente una gama diversa de sistemas dinámicos y el diseño de controladores que harán que estos sistemas se comporten de la manera deseada. Aunque tales controladores no necesariamente son electrónicos y por lo tanto la ingeniería de control es a menudo un subcampo de otras ingenierías como la mecánica.

Dispositivos tales como circuitos eléctricos, procesadores digitales y los microcontroladores son muy utilizados en todo sistema de control moderno. La ingeniería de control tiene un amplio rango de aplicación en áreas como los sistemas de vuelo y de propulsión de los aviones de aerolíneas, militares, en la carrera espacial y últimamente en la industria automotriz. (WIKIPEDIA, 2014)

El objetivo del control automático es poder manejar con una o más entradas (o referencia), una o más salidas de una planta o sistema, para hacerlo, la idea más primitiva es colocar entre la referencia y la planta, un controlador que sea el inverso de la función de transferencia de la planta, de tal manera que la función de transferencia de todo el sistema (la planta más el controlador), sea igual a uno; logrando de esta manera que la salida sea igual a la entrada; esta primera idea se denomina control en lazo abierto. Un ejemplo clásico de control en lazo abierto es una lavadora de ropa ya que ésta funciona durante un ciclo predeterminado sin hacer uso de sensores.

Las ventajas que tiene el control por retroalimentación son:

- Puede controlar sistemas inestables
- Puede compensar perturbaciones
- Puede controlar sistemas incluso si estos tienen errores de modelado

Desventajas:

- El uso de sensores hace más caro (en dinero) el control
- Se introduce el problema del ruido, al hacer la medición

CAPÍTULO III

3. PROYECCIÓN Y DISEÑO

3.1 Definición del problema

Se requiere diseñar un sistema de generación de hielo en bloque para utilizarlo como un banco didáctico y de pruebas, que trabaje de manera eficiente, con un mínimo consumo de energía, en menor tiempo y de fácil limpieza, después de su uso. Pero, además se busca obtener el tamaño y condiciones normadas de hielo en uso industrial y comercial.

3.2 Alternativas de solución

3.2.1 *Generador de hielo en bloques, generado por compresión de hielo.* Este sistema de producción de hielo está basado en comprimir las otras presentaciones comerciales de hielo (escarcha, escama, troceado, etc.) en bloques de 20 x 20 cm y longitud ajustable, además de poder ajustar la densidad del hielo. Este tipo de presentación es utilizada por las ventajas que presenta para el almacenamiento y transporte, frente a las presentaciones iniciales.

3.2.2 *Generador de hielo en bloques, generación por inmersión en salmuera.* En este tipo de generador el hielo se forma o se genera dentro de moldes metálicos (dimensiones dependen del tamaño, peso, del bloque), los cuales están inmersos en un tanque de salmuera a -10°C , enfriado por una unidad frigorífica.

La demanda de bloques de hielo ha crecido rápidamente debido a los avances tecnológicos en los equipos de refrigeración modernos. Las industrias químicas y de construcción, por ejemplo, usan bloques de hielo en situaciones donde el uso de equipos no es práctico. Las industrias de pesca es otro de los mayores consumidores de bloques de hielo, ya que lo usan para conservar el pescado desde el momento que es atrapado hasta que son vendidos. Los bloques de hielo también son usados en gran magnitud por los vendedores de alimentos y bebidas para conservar los alimentos y/o las bebidas frías.

Los bloques de hielo se derriten más lentamente que los otros tipos de hielos. Su forma rectangular lo hace fácil de elevar hasta unos 15 metros. Los bloques de hielo también son separados fácilmente para almacenarlo en grandes cantidades. Otros tipos de

hielos tienen la tendencia de congelarse en conjunto en una masa sólida haciendo difícil su manipulación y trabajo.

Este generador también consta de:

- Un sistema frigorífico, para refrigeración de la salmuera en el tanque de inmersión.
- Un sistema de agitación en la salmuera para producir convección forzada y así obtener una temperatura homogénea en el tanque.
- Sistema de soplado de aire en los moldes para provocar un movimiento en forma de remolinos para eliminar cualquier impureza y burbuja de aire en el agua
- Un sistema de control y adquisición de datos para la puesta en marcha del equipo y registro de datos de temperaturas del proceso y espesor de hielo.

3.3 Selección mejor alternativa

En las dos alternativas anteriormente presentadas se puede obtener un trabajo eficiente y crear hielo en condiciones flexibles, pero como se requiere diseñar un banco de generación de hielo en bloque con fines didácticos, es decir, poder observar la formación de hielo, entre otros parámetros, la mejor alternativa sería diseñar y construir un banco de generación de hielo en inmersión en salmuera.

Se seleccionó esta alternativa porque además de la razón mencionada anteriormente, tiene otros beneficios como su facilidad de elevar hasta unos 15 metros debido a la forma rectangular. Los bloques de hielo también son separados fácilmente para almacenarlo en grandes cantidades.

Otros tipos de hielos tienen la tendencia de congelarse en conjunto en una masa sólida haciendo difícil su manipulación y trabajo.

Otro de los beneficios de producir bloques de hielo es su facilidad de transporte. Cuando son enviados a localidades que están a menos de cuatro horas, los bloques de hielo pueden ser colocados en la parte trasera de un camión con sólo una tela asfáltica o un toldo para protegerlo de otros elementos.

3.4 Selección del refrigerante primario de trabajo

Refrigerante R-404A. El fluido refrigerante R404A se lo seleccionó por sus propiedades físico-químicas y termodinámicas que lo hace la mejor opción para sistemas de baja temperatura en los cuales hay que tomar en cuenta las altas presiones de trabajo, es capaz de absorber y liberar energía en forma de calor, por medio de cambios de fase en una forma cíclica dentro del sistema de refrigeración.

El refrigerante R404A es el resultado de una mezcla de tres refrigerantes R-125, R143A, R-134A; (44/52/4) porcentaje en peso respectivamente.

La principal aplicación recomendada por fabricantes son las instalaciones de sistemas de refrigeración de media y baja temperatura.

Para información más detallada acerca del refrigerante utilizado revisar el trabajo de tesis titulada *“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN CHILLER PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR”*

3.5 Selección del refrigerante secundario

Para la selección de un refrigerante secundario, se requiere que éste tenga unas propiedades termofísicas adecuadas para la instalación que se esté analizando. En este caso:

- Valores de capacidad específica y conductividad térmica elevados;
- Baja viscosidad a la temperatura de funcionamiento para obtener una gran capacidad de refrigeración con un bajo volumen de fluido y un mínimo cambio de temperatura;
- Obtener grandes coeficientes de transferencia de calor con una mínima diferencia de temperatura en los intercambiadores de calor y en el mueble;
- Obtener una mínima pérdida de presión del fluido del sistema, de manera que se pueda utilizar una bomba que consuma una mínima potencia.

La viscosidad tiene especial importancia, ya que es inversamente proporcional al número de Reynolds (y por tanto influirá en el tipo de flujo que circulará por el intercambiador de calor), y además determinará la pérdida de carga. Una gran viscosidad hace imposible mantener un flujo turbulento en un intercambiador de calor convencional (con una bomba aceptable).

Por otro lado, al determinar qué refrigerante secundario se va a utilizar en una aplicación particular, deben tenerse en cuenta los aspectos relacionados con la corrosión, toxicidad, inflamabilidad y coste. Es importante que el fluido no cause ningún problema material, que sea medioambientalmente aceptable, y que se pueda manejar sin peligro. Por tanto, existe la necesidad de examinar cuidadosamente la información del producto y las "hojas de seguridad" disponibles para los productos comerciales.

Actualmente se están realizando diversas investigaciones con los refrigerantes secundarios con cambio de fase, como el CO₂ y el ice-slurry, y sin duda, estas tecnologías se desarrollarán mucho más en los próximos años.

A continuación se expondrán, de forma básica, las ventajas e inconvenientes de utilizar distintos refrigerantes secundarios:

3.5.1 *Agua.* Se trata del refrigerante menos tóxico, pero su punto de congelación se encuentra a 0 °C (o justo por debajo), por lo que resulta totalmente inadecuado para instalaciones en las que se requieran temperaturas inferiores. Además, resulta corrosivo en presencia de oxígeno, si no se utilizan inhibidores de la corrosión eficientes y adecuados.

3.5.2 *Salmuera.* Las soluciones de cloruro de calcio y cloruro de sodio son las salmueras de refrigeración más comunes, especialmente en la industria de máquinas y en pistas de skating. El principal problema de las soluciones de cloruro de calcio es la corrosión.

Para el rango de temperaturas característico de las instalaciones de congelación necesarias en un supermercado (-30 °C, -25 °C), y de acuerdo con las tablas de Ashrae fundamentals, en ambos casos se requieren unas concentraciones superiores al 24 % en masa de CaCl₂ o NaCl. Dichos valores son de uso poco frecuente para este tipo de refrigerantes.

3.5.3 Glicoles inhibidos. Tanto el etilenglicol como el propilenglicol, inhibidos para controlar la corrosión, son líquidos incoloros y prácticamente inodoros que son miscibles en agua y en muchos componentes orgánicos. Sus principales ventajas son:

- Disminución del punto de congelación del agua.
- Baja volatilidad
- Relativa baja corrosividad (si están debidamente inhibidos).

Las soluciones de etilenglicol inhibido tienen mejores propiedades físicas que el propilenglicol, especialmente a temperaturas más bajas. En cambio, este último es menos tóxico, por lo que se prefiere en aquellas aplicaciones que conlleven un posible contacto humano (o que estén obligados mediante regulaciones).

3.5.4 CO₂. Comparando el CO₂ con algunos de los refrigerantes más utilizados en refrigeración comercial, como el amoníaco (NH₃) o R404A, el dióxido de carbono tiene una presión de saturación significativamente más elevada. Estas presiones han limitado la aplicabilidad de este refrigerante a unas temperaturas de aspiración de -32°C a -53°C. No obstante, en el ámbito de la refrigeración comercial convencional (como los supermercados) no son necesarias temperaturas de evaporación más bajas.

3.5.5 Cloruro de calcio. Finalmente se escoge al cloruro de calcio, grado alimenticio, como refrigerante secundario tomando en cuenta algunos parámetros, como lo son: el costo, la disponibilidad en el mercado, las concentraciones y temperaturas.

A continuación se describen las características del cloruro de calcio:

- Nombre Químico: Cloruro de calcio
- Formula Química: CaCl₂
- Peso molecular: 110.99 g/mol.
- Sinónimos: Cloruro cálcico Hidrofilita

Descripción:

- Cristales, gránulos, escamas o terrones delicuescentes.
- Soluble en agua y en alcohol.
- La solución acuosa es neutra o ligeramente alcalina.
- Producto químico poco tóxico, no combustible

- No es susceptible a producir flamas o explosiones.
- En condiciones normales es un producto estable.

Especificaciones Técnicas:

- Pureza 93% mín.
- Magnesio (Mg) 5% máx.
- Humedad 4% máx.
- Otras impurezas 0.4% máx.

Propiedades

- Apariencia Sólido granular
- Color Blanco
- Peso específico (25°C) 2.15
- Punto de fusión 772°C
- Punto de ebullición 1600°C

Aplicaciones

- En carreteras anticongelante y control de polvo.
- Lodo de perforación
- A prueba de polvo, de congelación y mineral, arena, piedra coque, carbón para deshielo
- Acondicionante de concreto
- Industria del papel y la pulpa
- Fungicidas, salmuera de refrigeración
- Agente secante y desecante
- Secuestrante de alimentos, productos farmacéuticos
- Presión de neumáticos, células electrolíticas.

3.6 Proyección para el diseño

Para comenzar con los cálculos de la carga térmica se consideraron los siguientes aspectos:

El tamaño del bloque de hielo fue propuesto por los autores y equivale a formar 10 Kg de hielo en 2 moldes de 114 x 94 x 470 mm.

Considerando que el equipo a construir será utilizado como un prototipo para prácticas de laboratorio, no se necesita gran capacidad de producción en el equipo, sino más bien es un estudio demostrativo de generación de hielo. Por esta razón se elige esta capacidad, ya que se puede encontrar fácilmente en el mercado una unidad condensadora con esta especificación.

Tomando en consideración que existe un tema de tesis planteado para la construcción de equipo para el enfriamiento de cloruro de calcio a través de un intercambiador de placas, el generador de hielo en bloques estará acoplado al tanque de almacenamiento de cloruro de calcio a una temperatura de -10°C

La temperatura de ingreso de refrigerante secundario al contacto con los moldes es de -10°C

Se considera este dato tomando en cuenta recomendaciones o datos técnicos de algunos generadores producidos en serie, para un tiempo de generación de hielo de entre 8 a 24 horas.

3.7 Cálculo de espesor de aislante

El aislante térmico es importante en el diseño para evitar que se produzcan grandes pérdidas de calor al equipo, el aislante que se va a ocupar es espuma de poliuretano la cual trabaja aceptablemente a rangos de temperatura bajos.

Para la estimación del espesor de aislante necesario se basa en recomendaciones existentes como la que se muestra a continuación:

Tabla 3. Coeficiente global de transferencia de calor recomendado

$^{\circ}\text{F}$	Piso $\frac{w}{m^2^{\circ}\text{C}}$	Pared $\frac{w}{m^2^{\circ}\text{C}}$	Techo $\frac{w}{m^2^{\circ}\text{C}}$
28-35	0,378	0,226	0,189

Fuente: métodos constructivos con paneles tipo sándwich, Rolf Koschade, pág. 85, 87

3.7.1 Convección libre - aire exterior. Para el cálculo del coeficiente convectivo por convección natural entre al aire que se encuentra en el interior del laboratorio de Transferencia de Calor y las paredes exteriores del tanque lo hacemos con los números adimensionales:

Las propiedades físicas del fluido (ρ , ν , α y β) se deben evaluar a temperatura de la capa límite también llamada filmica definida por:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (10)$$

Dónde:

Temperatura de superficie $T_s = 18^\circ\text{C}$ se asume para después iterar

Temperatura del aire $T_{\infty\text{aire}} = 21^\circ\text{C}$

$$T_f = \frac{18^\circ\text{C} + 21^\circ\text{C}}{2}$$

$$= 19.5^\circ\text{C}$$

Propiedades del aire evaluado a temperatura filmica (Anexo C)

Densidad $\rho = 1,205 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Viscosidad cinemática $\nu = 15,11 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

Conductividad térmica $k = 0,02576 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$

Calor específico $C_p = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

Número de Prandtl $Pr = 0,713$

Coefficiente de Expansión: $\beta = 0,00343 \frac{1}{^\circ\text{C}}$

Número de Grashof

$$Gr = \frac{g\beta}{\nu^2} (T_s - T_\infty) L^3 \quad (9)$$

$$Gr = \frac{\left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(0,00343 \frac{1}{^\circ\text{C}}\right) (21 - (13))^\circ\text{C} (0,08231148 \text{ m})^3}{\left(15,11 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)^2}$$

$$Gr = 6,22337 \times 10^5$$

Número de Rayleigh:

$$Ra = Gr * Pr \quad (13)$$

$$R_a = (6,22337 \times 10^5)(0,713) = 4,4373 \times 10^5$$

Número de Nusselt:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387R_a^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (19)$$

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(4,4373 \times 10^5)^{1/6}}{\left[1 + (0,559/0,713)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 13,3897$$

Coefficiente convectivo:

$$Nu = \frac{h_{\infty \text{ aire}} D}{K} \quad (5)$$

$$h_{\infty \text{ aire}} = \frac{Nu k}{D} = \frac{(13,3897) \left(0,02576 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)}{0,08081 \text{ m}}$$

$$h_{\infty \text{ aire}} = 4,3077 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

3.7.2 *Convección forzada interior – cloruro de calcio.* Para el cálculo del coeficiente convectivo entre la salmuera que se encuentra agitada y las paredes internas del tanque se utilizan los siguientes números adimensionales:

Calculo de la temperatura media aritmética de la salmuera:

$$T_m = \frac{T_i + T_e}{2} \quad (30)$$

$$T_i = -10 \text{ } ^\circ C$$

$$T_e = -8 \text{ } ^\circ C$$

$$T_m = \frac{-10\text{ °C} + (-8)\text{ °C}}{2}$$

$$T_m = -9\text{ °C}$$

Cálculo de la temperatura de la capa límite también llamada fílmica definida por:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (10)$$

Dónde:

Temperatura de superficie $T_s = -5\text{ °C}$ se asume para después iterar

Temperatura de la salmuera $T_\infty = -9\text{ °C}$

$$T_f = \frac{-9\text{ °C} + (-5)\text{ °C}}{2}$$

$$T_f = -7\text{ °C}$$

Propiedades físicas (ρ , ν , α y β) del cloruro de calcio evaluado a temperatura fílmica (Anexo D)

Densidad $\rho = 1198 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Viscosidad dinámica $\mu = 0,005 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}$

Conductividad térmica $k = 0,5361 \frac{\text{W}}{\text{m °C}}$

Calor específico $C_p = 3,014,496 \frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$

Velocidad del fluido $V_{\max} = 0,2 \text{ m/s}$

Se procede al calculo de los distintos parametros:

Número de Reynolds

$$Re_{\max} = \frac{\rho * V_{\max} * L_c}{\mu} \quad (7)$$

$$Re_{\max} = \frac{1198 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,2 \text{ m/s} * 0,0573533}{0,005 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}}$$

$$Re_{\max} = 2748.372$$

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{3,014496 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} * 0,005 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}}{0,5361 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}}}$$

$$Pr = 28,1128$$

Número de Nusselt:

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3} \quad (15)$$

$$Nu = 0.023 * (2748.372)^{0.8} * (28.1128)^{0.3}$$

$$Nu = 39.44176$$

Coefficiente convectivo

$$Nu = \frac{h_{\infty \text{ salmuera}} D}{K} \quad (5)$$

$$h_{\infty \text{ agua}} = \frac{Nu \ k}{D} = \frac{(39.44176) \left(0,5361 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}}\right)}{0,0573533 \text{ m}}$$

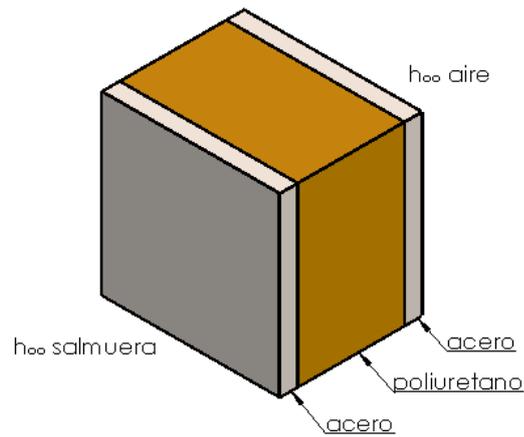
$$h_{\infty \text{ agua}} = 368.7043 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

$$R_{\text{Total}} = \frac{1}{UA} \quad (25)$$

$$U_o = \frac{1}{R_{\text{Total}} A_o}$$

Figura 10. Sección transversal de la pared del tanque



Fuente: Autores

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{conv } 1} + R_{\text{acero}} + R_{\text{poliuretano}} + R_{\text{acero}} + R_{\text{conv } 2} \quad (24)$$

$$R_{\text{Total}} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{e_{\text{poliuretano calculado}}}{k_{\text{poliuretano}} A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{1}{h_2 A}$$

Remplazando en Ecuación 25 se obtiene:

$$U_o = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_1 A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{e_{\text{poliuretano calculado}}}{k_{\text{poliuretano}} A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{1}{h_2 A} \right] A}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} + \frac{e_{\text{poliuretano calculado}}}{k_{\text{poliuretano}}} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} + \frac{1}{h_2}}$$

Dónde:

Espesor de acero

$$e_{\text{acero}} = 0,0015 \text{ m}$$

Conductividad térmica de acero

$$k_{\text{acero}} = 16,86 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}}$$

Conductividad térmica del poliuretano

$$k_{\text{poliuretano}} = 0,017 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}}$$

Calculo de espesor de aislante:

$$U_{\text{rec}} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} + \frac{e_{\text{poliuretano calculado}}}{k_{\text{poliuretano}}} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} + \frac{1}{h_2}}$$

$$e_{\text{poliuretano calculado pared}} = k_{\text{poliuretano}} \left(\frac{1}{U_{\text{rec}}} - \frac{1}{h_1} - \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} - \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} - \frac{1}{h_2} \right)$$

Para el piso:

$$e_{\text{pu calc piso}} = 0,017 \frac{W}{m^{\circ}C} \left(\frac{1}{0,378 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}} - \frac{1}{368,7043 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}} - \frac{0,0015 m}{16,86 \frac{W}{m^{\circ}C}} - \frac{0,0015 m}{16,86 \frac{W}{m^{\circ}C}} - \frac{1}{4,3077 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}} \right)$$

$$e_{\text{pu calc piso}} = 0,08595 m$$

Para las paredes:

$$e_{\text{pu calc pared}} = 0,017 \frac{W}{m^{\circ}C} \left(\frac{1}{0,226 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}} - \frac{1}{368,7043 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}} - \frac{0,0015 m}{16,86 \frac{W}{m^{\circ}C}} - \frac{0,0015 m}{16,86 \frac{W}{m^{\circ}C}} - \frac{1}{4,3077 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C}} \right)$$

$$e_{\text{pu calc pared}} = 0,071225 m$$

Se selecciona un espesor de aislante promedio entre los dos espesores encontrados.

$$e_{\text{poliuretano}} = \frac{e_{\text{poliuretano calculado pared}} + e_{\text{poliuretano calculado piso}}}{2}$$

$$e_{\text{poliuretano}} = \frac{0,08595 m + 0,071225 m}{2}$$

$$e_{\text{poliuretano}} = 0,0786m$$

Como el espesor obtenido es $e_{\text{poliuretano}} = 0,0786m$ se selecciona un espesor de aislante de 3 in (0,0762 m), debido a que en el mercado no existe aislamiento de esa medida, y la siguiente medida es de 4 in, finalmente se selecciona aislamiento tipo

sándwich de 2 in (0,0508 m), además de quedar más estético con las dimensiones del tanque.

3.8 Cálculo de la carga térmica

La carga térmica que puede cubrirse por el intercambiador

$$q_{\text{neto}} = q_{\text{agua-hielo}} + q_{\text{perdidas}} \quad (31)$$

Dónde:

Calor necesario para generar hielo	$q_{\text{agua-hielo}}$
Flujo de calor al ambiente	$q_{\text{pérdidas}}$

3.8.1 Flujo de calor para generar hielo. El flujo de calor necesario para generar hielo, se lo realiza a través de convección forzada por la agitación de la salmuera y el agua en los moldes se encuentra en reposo

Convección libre - agua. Para el cálculo del coeficiente convectivo por convección natural del agua y las paredes internas del molde lo hacemos con los números adimensionales:

Las propiedades físicas del fluido (Pr , ν , α y β) se deben evaluar a temperatura de la capa límite también llamada filmica definida por:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (10)$$

Dónde:

Temperatura de superficie	$T_s = 0^\circ\text{C}$	se asume para después iterar
Temperatura del agua	$T_{\infty\text{agua}} = 18^\circ\text{C}$	

$$T_f = \frac{0^\circ\text{C} + 18^\circ\text{C}}{2} = 9^\circ\text{C}$$

Propiedades del agua evaluada a temperatura filmica (Anexo C)

Densidad	$\rho = 999,86 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
----------	--

Viscosidad cinemática	$\gamma = 1,403 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
-----------------------	---

Conductividad térmica	$k = 0,5615 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
Calor específico	$C_p = 4196,88 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$
Coefficiente de Expansión:	$\beta = 0,00021 \frac{1}{^\circ C}$

Número de Grashof

$$Gr = \frac{g \beta}{\gamma^2} (T_s - T_\infty) L^3 \quad (9)$$

$$Gr = \frac{\left(9,81 \frac{m}{s^2}\right) \left(0,00021 \frac{1}{^\circ C}\right)}{\left(1,403 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}\right)^2} (18 - (0))^\circ C (0,0244211 m)^3$$

$$Gr = 2,43888 \times 10^5$$

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{4196,88 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} * 0,0014125 \frac{Kg}{m \cdot s}}{0,5615 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}$$

$$Pr = 10.5576$$

Número de Rayleigh

$$R_a = Gr * Pr \quad (13)$$

$$R_a = (2,43888 \times 10^5)(10.5576)$$

$$R_a = 25,7487 \times 10^5$$

Número de Nusselt

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 R_a^{1/6}}{\left[1 + \left(0,492/Pr\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (19)$$

$$\text{Nu} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(25,7487 \times 10^5)^{1/6}}{\left[1 + \left(0,492/10.5576 \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$\text{Nu} = 26,4282$$

Coefficiente convectivo

$$\text{Nu} = \frac{h_{\infty \text{aire}} D}{K} \quad (5)$$

$$h_{\infty \text{aire}} = \frac{\text{Nu} k}{D} = \frac{(26,4282) \left(0,5615 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \right)}{0,0244211 \text{ m}}$$

$$h_{\infty \text{aire}} = 607,64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}}$$

Convección forzada exterior –cloruro de calcio. Para el cálculo del coeficiente convectivo entre la salmuera que se encuentra agitada y las paredes externas del molde se utilizan los siguientes números adimensionales:

Cálculo de la temperatura media aritmética de la salmuera:

$$T_m = \frac{T_i + T_e}{2} \quad (30)$$

$$T_i = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_e = -8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_m = \frac{-10 \text{ }^{\circ}\text{C} + (-8) \text{ }^{\circ}\text{C}}{2}$$

$$T_m = -9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Cálculo de la temperatura de la capa límite también llamada fílmica definida por:

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} \quad (10)$$

Dónde:

Temperatura de superficie $T_s = 0^\circ\text{C}$ se asume para después iterar

Temperatura de la salmuera $T_\infty = -9^\circ\text{C}$

$$T_f = \frac{-9^\circ\text{C} + (0)^\circ\text{C}}{2}$$

$$T_f = -4,5^\circ\text{C}$$

Propiedades físicas (Pr, ν , α y β) del cloruro de calcio evaluado a temperatura fílmica (Anexo D)

Densidad $\rho = 1195 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Viscosidad dinámica $\mu = 0,0048 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}$

Conductividad térmica $k = 0,538 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}$

Calor específico $Cp = 3,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$

Velocidad del fluido $V_{\text{max}} = 0,2 \text{ m/s}$

Número de Reynolds

$$\text{Re}_{\text{max}} = \frac{\rho * V_{\text{max}} * D}{\mu}$$

$$\text{Re}_{\text{max}} = \frac{1195 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,2 \text{ m/s} * 0,024421}{0,0048 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}}$$

$$\text{Re}_{\text{max}} = 2855,719$$

Número de Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{Cp * \mu}{k}$$

$$\text{Pr} = \frac{3,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * 0,0048 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}}{0,538 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}}$$

$$Pr = 34,7063$$

Número de Nusselt:

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3}$$

$$Nu = 0.023 * (2855,719)^{0.8} * (34,7063)^{0.3}$$

$$Nu = 71,5612$$

Coefficiente convectivo

$$Nu = \frac{h_{\infty \text{ salmuera}} D}{K} \quad (5)$$

$$h_{\infty \text{ salmuera}} = \frac{Nu k}{D} = \frac{(71,5612) \left(0,538 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right)}{0,024421 \text{ m}}$$

$$h_{\infty \text{ salmuera}} = 1576,499 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Cálculo del flujo de calor

$$q_{\text{necesario}} = U_o * A * F * LMTD$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

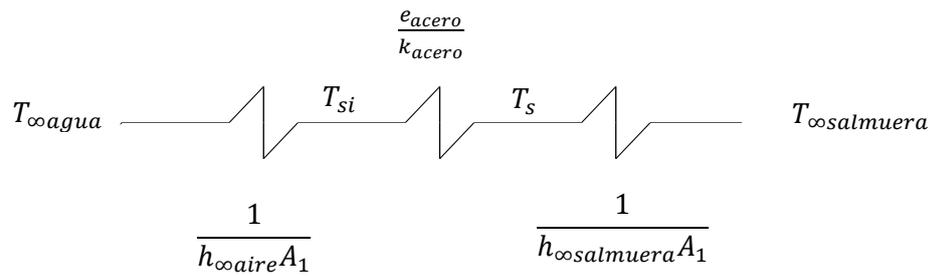
$$R_{\text{Total}} = \frac{1}{U_o A} \quad (25)$$

$$U_o = \frac{1}{R_{\text{Total}} A_o}$$

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{conv } 1} + R_{\text{acero}} + R_{\text{conv } 2} \quad (31)$$

$$R_{\text{Total}} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{1}{h_2 A}$$

Figura 11. Resistencias térmicas



Fuente: Autores

Remplazando se obtiene:

$$U_o = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_1 A} + \frac{e_{acero}}{k_{acero} A} + \frac{1}{h_2 A} \right]} A$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_{acero}}{k_{acero}} + \frac{1}{h_2}}$$

Dónde:

Espesor de acero

$$e_{acero} = 0,002 \text{ m}$$

Conductividad térmica de acero

$$k_{acero} = 16,86 \frac{W}{m \cdot K}$$

Coficiente convectivo exterior

$$h_1 = h_{\infty salmuera} = 1576,499 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

Coficiente convectivo interior

$$h_2 = h_{\infty agua} = 607,6479 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{1576,499 \frac{W}{m^2 \cdot C}} + \frac{0,002 \text{ m}}{16,86 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{607,6479 \frac{W}{m^2 \cdot C}}}$$

$$U_o = 422,1236 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

Área en contacto

$$A_t = (0,114 \text{ m})(0,094 \text{ m}) + 2(0,114)(0,47) + 2(0,094)(0,47)$$

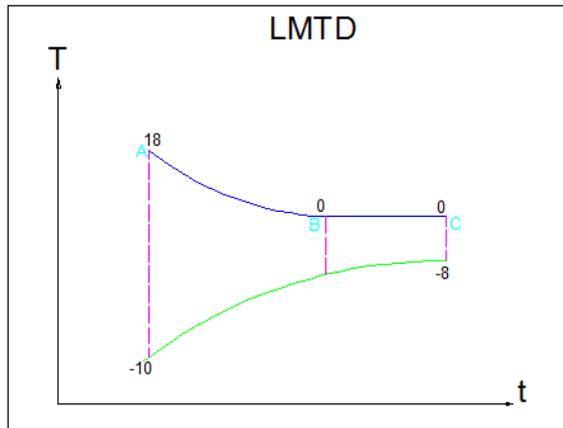
$$A_t = 0,0,2062 \text{ m}^2$$

Determinación del factor F

F=1 intercambiadores de doble tubo, condensadores y evaporadores; cambio de fase

Cálculo de la temperatura media logarítmica

Figura 12. Diferencia media logarítmica

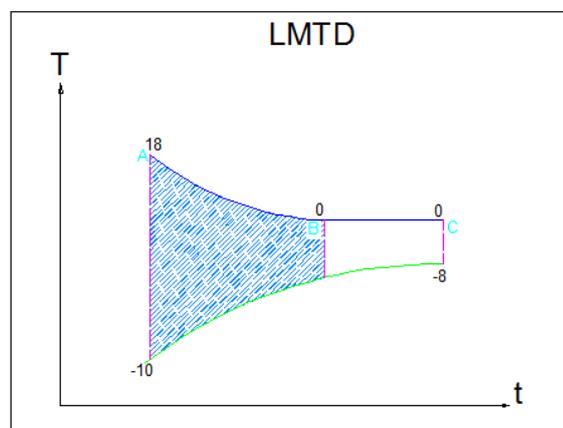


Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura no se puede hacer el cálculo directo de la diferencia de temperaturas media logarítmica para lo cual se divide en dos tramos:

Para el tramo A-B

Figura 13. Diferencia media logarítmica tramo A-B



Fuente: Autores

$$LMTD_{\text{Tramo A-B}} = \frac{\Delta T_A - \Delta T_B}{\ln \frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}} \quad (28)$$

Y

$$\Delta T_A = T_{Ac} - T_{Af} \quad (32)$$

Dónde:

Temperatura a la que ingresa el agua $T_{Ac} = 18^\circ\text{C}$

Temperatura que ingresa el refrigerante $T_{Af} = -10^\circ\text{C}$

$$\Delta T_A = 18^\circ\text{C} - (-10^\circ\text{C}) = 28^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_B = T_{Bc} - T_{Bf} \quad (32)$$

Dónde:

Temperatura a la que se encuentra el agua en el punto B $T_{Bc} = 0^\circ\text{C}$

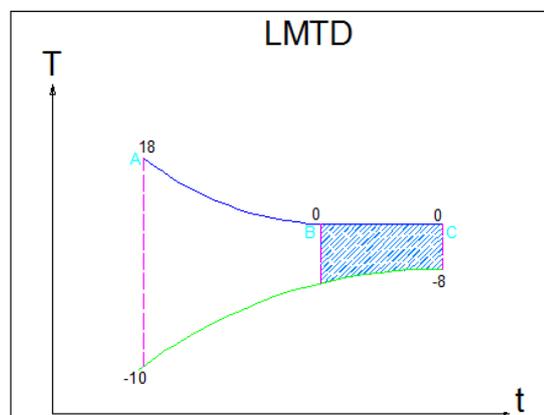
Temperatura a la que se encuentra el refrigerante en el punto B $T_{Bf} = -8,5$

$$\Delta T_B = 0^\circ\text{C} - (-8,5^\circ\text{C}) = 8,5^\circ\text{C}$$

$$LMTD_{\text{Tramo A-B}} = \frac{28^\circ\text{C} - 8,5^\circ\text{C}}{\ln \frac{28^\circ\text{C}}{8,5^\circ\text{C}}} = 16,3572^\circ\text{C}$$

Para el tramo B-C

Figura 14. Diferencia media logarítmica tramo B-C



Fuente: Autores

$$\text{LMTD}_{\text{Tramo B-C}} = \frac{\Delta T_B - \Delta T_C}{\ln \frac{\Delta T_B}{\Delta T_C}} \quad (28)$$

y

$$\Delta T_B = T_{Bc} - T_{Bf} \quad (32)$$

Dónde:

Temperatura a la que ingresa el agua $T_{Bc} = 0^\circ\text{C}$

Temperatura que ingresa el refrigerante $T_{Bf} = -8,5^\circ\text{C}$

$$\Delta T_A = 0^\circ\text{C} - (-8,5^\circ\text{C}) = 8,5^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_C = T_{Cc} - T_{Cf} \quad (32)$$

Dónde:

Temperatura a la que se encuentra el agua en el punto C $T_{Cc} = 0^\circ\text{C}$

Temperatura a la que se encuentra el refrigerante en el punto C $T_{Cf} = -8,5$

$$\Delta T_B = 0^\circ\text{C} - (-8^\circ\text{C}) = 8^\circ\text{C}$$

$$\text{LMTD}_{\text{Tramo A-B}} = \frac{8,5^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}}{\ln \frac{8,5^\circ\text{C}}{8^\circ\text{C}}} = 8,2475^\circ\text{C}$$

Entonces:

$$\text{LMTD}_{\text{Balanceo}} = \frac{Q}{\frac{q_{s \text{ agua}}}{\text{LMTD}_{\text{Tramo A-B}}} + \frac{q_{s \text{ refr.}}}{\text{LMTD}_{\text{Tramo B-C}}}}$$

Dónde:

Calor total $Q = q_{s \text{ agua}} + q_{s \text{ refr.}} = 32980,111 \text{ W}$

Calor sensible agua $q_{s \text{ agua}} = 15,511 \text{ W}$

Calor sensible Refrigerante $q_{s \text{ refr.}} = 2332,34 \text{ W}$

$$\text{LMTD}_{\text{Balanceo}} = \frac{2347,96 \text{ W}}{\frac{15,511 \text{ W}}{16,3572^\circ\text{C}} + \frac{2332,34 \text{ W}}{8,2475^\circ\text{C}}}$$

$$\text{LMTD}_{\text{Balanceo}} = 8,2748 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$q_s = U_o A_o \text{LMTD}_{\text{balanceado}}$$

$$q_s = \left(422,1236 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}}\right) (0,2062\text{m}^2)(8,2748 \text{ }^{\circ}\text{C}) = 720,3773 \text{ W}$$

Tiempo estimado para enfriar el agua

Volumen que ocupa el agua en los 2 molde

Tabla 4. Dimensiones del molde

Dimensiones del molde	
Long	0,114
Anc.	0,094
Alto.	0,47

Fuente: Autores

$$V_{\text{molde}} = 2(0,114\text{m})(0,094\text{m})(0,47\text{m}) = 0,01 \text{ m}^3$$

Masa de agua

$$m_{\text{agua}} = \rho V_{\text{agua}} = \left(999,86 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (0,010073 \text{ m}^3) = 10,07163 \text{ kg}$$

$$q_s \text{ forzada} = \frac{m_{\text{agua}} c_{p\text{agua}} \Delta t}{t_{\text{enfriar el agua}}} \quad (32)$$

$$t_{\text{enfriar el agua}} = \frac{m_{\text{agua}} c_{p\text{agua}} \Delta t}{q_s \text{ forzada}}$$

$$\Delta t = T_i - T_e = 18^{\circ}\text{C} - 0,5^{\circ}\text{C} = 17,5^{\circ}\text{C}$$

$$t_{\text{enfriar el agua}} = \frac{m_{\text{agua}} c_{p\text{agua}} \Delta t}{q_s} = \frac{(10,07163 \text{ kg}) (4188 \text{ J/kg }^{\circ}\text{C}) (18 - (0,5))^{\circ}\text{C}}{720,3773 \text{ W}}$$

$$t_{\text{enfriar el agua}} = 1024,668\text{s}$$

$$t_{\text{enfriar el agua}} = 17,08 \text{ minutos}$$

3.8.2 *Flujo de calor al ambiente.* El flujo de calor al ambiente se lo realiza con una convección libre ya que el prototipo se ubica en el interior del laboratorio de transferencia de calor de la Facultad de Mecánica, y la velocidad del viento se le considera nula.
Cálculo del flujo de calor

$$q_{\text{perdida}} = U_o * A * F * \text{LMTD}$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

$$R_{\text{Total}} = \frac{1}{U_o A} \quad (25)$$

$$U_o = \frac{1}{R_{\text{Total}} A_o}$$

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{conv } 1} + R_{\text{acero}} + R_{\text{poliuretano}} + R_{\text{acero}} + R_{\text{conv } 2} \quad (24)$$

$$R_{\text{Total}} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{e_{\text{poliuretano}}}{k_{\text{poliuretano}} A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{1}{h_2 A}$$

Remplazando se obtiene:

$$U_o = \frac{1}{\left[\frac{1}{h_1 A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{e_{\text{poliuretano}}}{k_{\text{poliuretano}} A} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}} A} + \frac{1}{h_2 A} \right] A}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} + \frac{e_{\text{poliuretano}}}{k_{\text{poliuretano}}} + \frac{e_{\text{acero}}}{k_{\text{acero}}} + \frac{1}{h_2}}$$

Dónde:

Espesor de acero

$$e_{\text{acero}} = 0,0015 \text{ m}$$

Conductividad térmica de acero

$$k_{\text{acero}} = 16,86 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Espesor del aislante

$$e_{\text{poliuretano}} = 0,0508 \text{ m}$$

Conductividad térmica del poliuretano

$$k_{\text{poliuretano}} = 0,017 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Coficiente convectivo interior

$$h_1 = h_{\infty \text{ salmuera}} = 368,7043 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}$$

Coefficiente convectivo exterior

$$h_2 = h_{\infty aire} = 4,3077 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{368,7043 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}} + \frac{0,0015 \text{ m}}{16,86 \frac{W}{m \text{ } ^\circ K}} + \frac{0,0508 \text{ m}}{0,017 \frac{W}{m \text{ } ^\circ K}} + \frac{0,0015 \text{ m}}{16,86 \frac{W}{m \text{ } ^\circ K}} + \frac{1}{4,3075 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}}}$$

$$U_0 = 0,3102 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Área Pared 1:

$$A_{\text{pared } 1} = (0,54 \text{ m})(0,60 \text{ m}) = 0,3242 \text{ m}^2$$

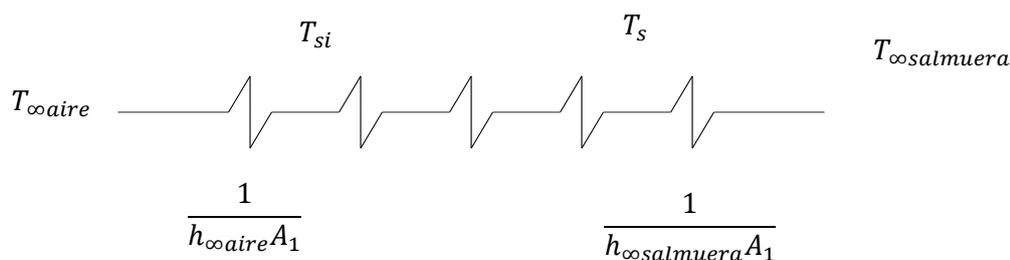
$$q_{\text{pared } 1} = U_0 A_{\text{pared } 1} (T_{\infty \text{aire}} - T_{\infty \text{salmuera}})$$

$$q_{\text{pared } 1} = \left(0,3102 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}\right) (0,3242 \text{ m}^2) (21 - (-10)) \text{ } ^\circ C$$

$$q_{\text{pared } 1} = 3,11794 \text{ W}$$

Se itera para encontrar la temperatura de pared.

Figura 15. Resistencias térmicas



Fuente: Autores

Cálculo iterativo de la temperatura de la pared parte externa

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_t} \tag{23}$$

$$\Delta T = q \sum R_t$$

$$\sum Rt = \frac{1}{h_{\infty\text{aire}}A_1} \quad (24)$$

$$\sum Rt = \frac{1}{\left(4,3077 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) (0,3242 m^2)} = 0,7161 \frac{^\circ C}{W}$$

$$\Delta T = (3,11794 W) \left(0,7161 \frac{^\circ C}{W}\right) = 2,2327 ^\circ C$$

$$\Delta T = T_{\infty\text{aire}} - T_{si}$$

$$T_{si} = T_{\infty\text{aire}} - \Delta T$$

$$T_{si} = 21 ^\circ C - 2,2327 ^\circ C$$

$$T_{si} = 18,7674 ^\circ C$$

Cálculo iterativo de la temperatura de la pared parte interna

$$q = \frac{\Delta T}{\sum Rt} \quad (23)$$

$$\Delta T = q \sum Rt$$

$$\sum Rt = \frac{1}{h_{\infty\text{salmuera}}A_1} \quad (24)$$

$$\sum Rt = \frac{1}{\left(368,7043 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) (0,2409 m^2)} = 0,01126 \frac{^\circ C}{W}$$

$$\Delta T = (3,11794 W) \left(0,01126 \frac{^\circ C}{W}\right) = 0,035104 ^\circ C$$

$$\Delta T = T_s - T_{\infty\text{agua}}$$

$$T_s = T_{\infty\text{agua}} + \Delta T$$

$$T_{si} = -10 ^\circ C + 0,035104 ^\circ C$$

$$T_{si} = -9,9649^{\circ}\text{C}$$

Con estas nuevas temperaturas de pared se itera obteniéndose un coeficiente global de transferencia de calor de:

$$U_o = 0,33465 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

Pared 1

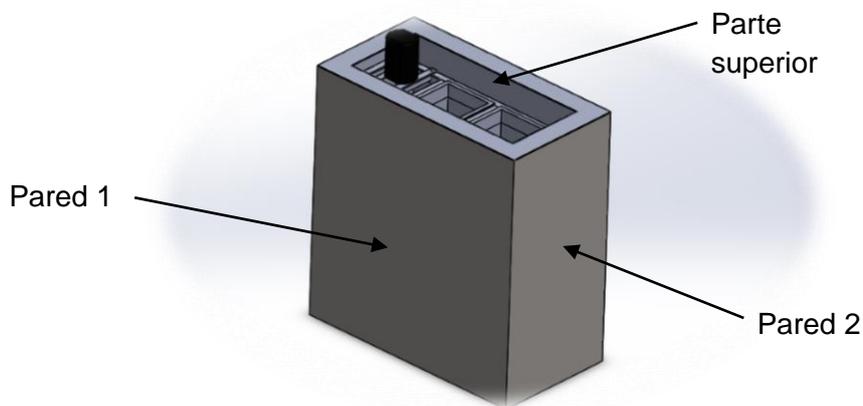
$$A_{\text{pared 1}} = (0,54 \text{ m})(0,60\text{m}) = 0,3242 \text{ m}^2$$

$$q_{\text{pared 1}} = U_o A_{\text{pared 1}} (T_{\infty\text{aire}} - T_{\infty\text{salmuera}})$$

$$q_{\text{pared 1}} = \left(0,33473 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}\right) (0,3242 \text{ m}^2) (21 - (-10))^{\circ}\text{C}$$

$$q_{\text{pared 1}} = 3,364025\text{W}$$

Figura 16. Disposición de las paredes del tanque



Fuente: Autores

Pared 2

$$A_{\text{pared 2}} = (0,29 \text{ m})(0,60\text{m}) = 0,17519 \text{ m}^2$$

$$q_{\text{pared 2}} = U_o A_{\text{pared 2}} (T_{\infty\text{aire}} - T_{\infty\text{agua}})$$

$$q_{pared 2} = \left(0,334731 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) (0,17519 m^2) (21 - 10)^\circ C$$

$$q_{pared 2} = 1,7805 W$$

Piso

$$A_{piso} = (0,29 m)(0,54 m) = 0,15411 m^2$$

$$q_{piso} = U_0 A_{piso} (T_{\infty aire} - T_{\infty agua})$$

$$q_{piso} = \left(0,334731 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) (0,15411 m^2) (21 - 10)^\circ C$$

$$q_{piso} = 1,599144 W$$

Parte superior:

En esta parte se deben tomar en cuenta que el agua y la salmuera se encuentran en contacto con el aire exterior.

Perdida de calor (agua - aire)

$$U_{s1} = \frac{1}{\frac{1}{h_{agua}} + \frac{1}{h_{Aire ext}}}$$

Dónde:

Coeficiente convectivo agua $h_{\infty agua} = 607,6479 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Coeficiente convectivo Aire $h_{\infty aire} = 4,3077 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

$$U_{s1} = \frac{1}{\frac{1}{607,6479 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + \frac{1}{4,3077 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}}$$

$$U_{s1} = 4,2774 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$A_{s1} = 2(0,114 m)(0,094 m) = 0,0214 m^2$$

$$q_{s1} = U_{s1} A_{s1} (T_{\infty \text{aire}} - T_{\infty \text{agua}})$$

$$q_{s2} = \left(4,2774 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) (0,0214 m^2) (21 - 9)^\circ C$$

$$q_{s2} = 1,1 W$$

Perdida de calor (salmuera - aire)

$$U_{s2} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{salmuera}}} + \frac{1}{h_{\text{Aire ext}}}}$$

Dónde:

Coefficiente convectivo salmuera $h_{\infty \text{salmuera}} = 1576,499 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

Coefficiente convectivo Aire $h_{\infty \text{aire}} = 4,3077 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

$$U_{s2} = \frac{1}{\frac{1}{1576,499 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + \frac{1}{4,3077 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}}$$

$$U_{s2} = 4,2956 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$A_{s2} = (0,44 * 0,18) - 2(0,114 m)(0,094 m) = 0,0214 m^2$$

$$q_{s2} = U_{s2} A_{s2} (T_{\infty \text{aire}} - T_{\infty \text{salmuera}})$$

$$q_{s2} = \left(4,2956 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) (0,0214 m^2) (21 + 9)^\circ C = 7,745 W$$

Pérdida de calor total

$$q_{p \text{ total}} = q_{s1} + q_{s2} + q_{\text{piso}} + 2 q_{\text{pared 1}} + 2 q_{\text{pared 2}}$$

$$q_{p \text{ total}} = 1,1 W + 7,745 W + 1,59914 W + 2 (3,3640 W) + 2(1,7805 W) = 20,4334 W$$

$$q_{\text{neto}} = q_{\text{equipo}} + q_{\text{pérdidas}}$$

Dónde:

Calor necesario para generar hielo $q_{\text{hielo}} = 720,3773 W$

Flujo de calor al ambiente

$$q_{p\acute{e}rdidas} = 20,43051 W$$

$$q_{neto} = 718,1696 W + 20,43051 W$$

$$q_{neto} = 740,8107 W$$

La capacidad calorífica que posee el refrigerante, la obtendremos a partir del calor sensible del refrigerante

$$q_{refrigerante} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (34)$$

$$q_{refrigerante} = 0,3869 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3014,496 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot [-8 - (-10)]^\circ\text{C}$$

$$q_{refrigerante} = 2332,341 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

$$q_{refrigerante} = 2332,341 W$$

Con esto podemos verificar que se cubre la necesidad calorífica para generar hielo y las pérdidas

$$q_t = q_{refrigerante} - q_{neto}$$

$$q_t = 2332,341 W - 740,8107 W$$

$$q_t = 1591,53 W$$

3.9 Selección de los elementos para la unidad frigorífica

El proyecto de tesis que se está desarrollando es un equipo complementario a un trabajo de tesis realizado anteriormente, por lo cual se está trabajando con los mismo equipos de refrigeración, a continuación se detallaran algunos de los equipos seleccionados.

Si fuese necesario información detalla revisar la tesis titulada "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN CHILLER PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR"

En el país existen diversos proveedores de equipos y componentes de refrigeración, en una gran variedad de marcas, características y calidades, pero la que más se destaca en solución de problemas de ingeniería en frío y calor es DANFOSS, destacando su participación en el campo alimenticio donde satisface necesidades de clientes que exigen alto desempeño como demanda de la industria moderna.

Para la adecuada selección de equipos y elementos es necesario determinar primeramente los parámetros de funcionamiento que gobiernan el sistema.

3.9.1 Parámetros de funcionamiento

Refrigerante	R-404A
Evaporador	
Temperatura de la salmuera o producto	-10°C.
Temperatura de evaporación	-15°C.
Temperatura de condensación	35°C.
Potencia frigorífica del evaporador	10550,55 W.
Carga térmica total	4940,89 W.

Nota: La potencia frigorífica del evaporador o intercambiador de calor de placas es supuesta puesto a que como se indica en su catálogo de aplicación la capacidad está dada con otros parámetros, primeramente el fluido de cálculo es agua y las temperaturas de descarga tienen una variación térmica con las de entrada de entre (4 y 7)°C, Por tanto la real capacidad se tiene recalculando o corrigiendo mediante la ecuación de calor sensible, considerando que no hay cambio de estado en el producto, lo que no se puede variar es el caudal de suministro de fluido por parte de la bomba al intercambiador debido a que su cálculo es preciso en diámetro de tubería y área de transferencia de calor que debe mantenerse constante de no ser así el fluido se congela en el interior y causa daños que específicos en el manual de mantenimiento del equipo.

3.9.2 Selección del evaporado. Seguido se muestran las características del evaporador.

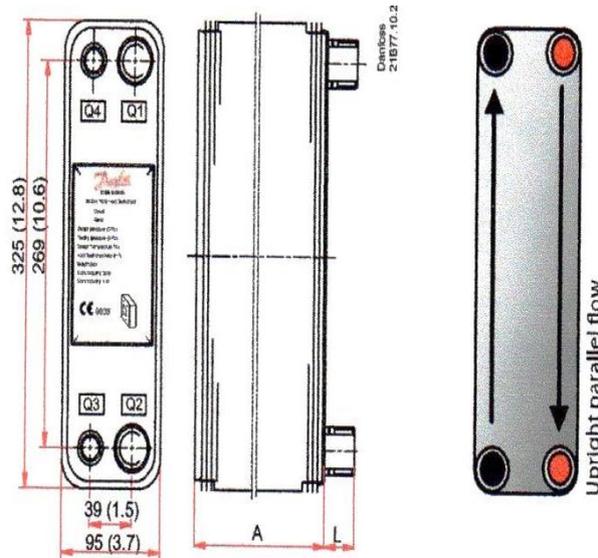
Tabla 5. Características intercambiador de calor.

Tipo	Intercambiador de calor de placas
Modelo	B3-030-30-3.0-HQ
Capacidad frigorífica	3TR - 10,54 KW

Temperatura de diseño	-196/+200 °C
Presión de prueba	45 bar - 3 MPa
Material de la placa estándar	AISI 316L
Material de soldadura	Cobre

Fuente: ARMENDARIS, 2014.

Figura 17. Área de transferencia de calor del intercambiador.



Number of plates	A (mm)	Weight (kg)	Channel volume (L) Q1 Q2 side/ Q3 Q4 side	Heat transfer area (m ²)
n	9 + 1.5n	1 + 0.09n	0.028 × n/2/ 0.028 × (n-2)/2	(n-2) × 0.023

Fuente: Making modern living possible, DANFOSS dimensional data 2009.

n=30 placas.

$$A_{\text{transferencia}} = [(n - 2) \times 0,023] \text{m}^2$$

$$A_{\text{transferencia}} = [(30 - 2) \times 0,023] \text{m}^2$$

$$A_{\text{transferencia}} = 0,644 \text{m}^2$$

3.9.3 Selección unidad condensadora. A continuación se detalla las características de la unidad condensadora.

Figura 18. Unidad condensadora seleccionada



Fuente: ARMENDARIS, 2014.

Tabla 6. Características de la unidad condensadora.

Compresor modelo	DANFOSS NTZ-068
Unidad condensadora	DANFOSS LCZ028E41N
Potencia nominal	3HP
Potencia frigorífica	6180 W
Temperatura evaporación	-15°C
Temperatura condensación	35°C
Voltaje requerido	220V-Monofásico
Gas refrigerante	R-404A / R-507
Rango de temperaturas de evaporación	-10°C / -40°C

Fuente: ARMENDARIS, 2014.

Además la unidad condensadora Danfoss incluye:

- Separador de aceite.
- Acumulador de succión.
- Filtro secador.
- Visor de líquido.
- Válvula de bola GBC.

3.9.4 Dispositivos de control de flujo de refrigerante

Válvula de expansión. La selección de la válvula de expansión se realiza con la capacidad frigorífica calculada.

Carga térmica total: $q_{total} = 4940,89W = 1,4TR$ (Toneladas de refrigeración)

Figura 19. Válvula de expansión termo estática



Fuente: www.danfoss.com.co

Por facilidad de instalación se busca una válvula de expansión para roscar, la tubería de entrada debe ser la de salida del condensador es decir $\frac{1}{2}$ pulg Otro parámetro es el fluido refrigerante para el diseño se considera el R-404A.

Se selecciona el orificio N°. 4 que nos resulta en una capacidad frigorífica de 1,7 TR = 5978,65W.

3.9.5 Selección de las tuberías. Para la selección de las cañerías a utilizar en el sistema es necesario analizar los tramos críticos que son:

- Línea de líquido (hacia el evaporador).
- Línea de vapor (hacia el compresor).

Se toma como referencia el diagrama del proveedor del refrigerante utilizado los parámetros recomendados como la velocidad que es:

Tabla 7. Velocidades del gas refrigerante R-404A obtenido del fabricante

Para líquido	1,25m/s = 246,06 ft/min
Para vapor	15m/s = 2952,76 ft/min

Fuente: Catalogo FRIOGAS.

Además de las temperaturas de operación:

Temperatura de evaporación -15°C = 5°F

Temperatura de condensación 35°C = 95°F

Se obtiene los siguientes diámetros:

Tabla 8. Diámetros recomendadas para el cálculo.

Línea de succión (líquido)	½ plg. = 0,0127m
Línea de descarga (vapor)	7/8 plg. = 0,0222m

Fuente: ARMENDARIS, 2014

3.10 Dispositivos de control

Para tener un funcionamiento óptimo de acuerdo a los parámetros de producto se incorporan al sistema dispositivos que permiten controlar el trabajo del sistema además de actuar como dispositivos de seguridad y de autoprotección de los circuitos.

Los dispositivos considerados son los siguientes: Termostato, presóstato y válvula solenoide.

3.10.1 Termostato. La función de éste dispositivo electrónico es de controlar la temperatura de la salmuera dentro del rango establecido haciendo posible además que el sistema se adapte a las diferentes necesidades que se puedan presentar de acuerdo al servicio que se le dé al equipo.

Tabla 9. Características del termostato.

Marca	Full gauge
Modelo	Mt-512 ri plus
Rango de temperaturas	-50°C / 75°C

Fuente: Catálogo FULL GAUGE.

Figura 20. Termostato Full Gauge seleccionado.



Fuente: http://mco-s1-p.mlstatic.com/datalogger-de-temperatura-mt512-ri-log-full-gauge-1225-MCO18729614_8013-F.jpg

3.10.2 Presóstato. La unidad condensadora seleccionada trae instalado de fábrica un presóstato dual para controlar tanto la presión de alta como de baja.

Figura 21. Presóstato incluido en la unidad de condensación seleccionada



Fuente: Autores.

3.11 Selección de la bomba y sistema hidráulico

3.11.1 Caudal de bombeo (Q_b). Para la determinación del caudal de bombeo se debió tomar en cuenta que la capacidad del tanque y que el proceso neto a realizar sería la recirculación de salmuera de un depósito al tanque de producción, bajo estos parámetros se estableció el caudal en 4gpm, caudal que surtirá la bomba en un tiempo de 2 a 3 minutos, tiempo en el cual la salmuera “caliente” será cambiada por salmuera a -10, o según sea la necesidad

3.11.2 *Determinación del diámetro de descarga (d_d)*. La selección del diámetro de se lo puede determinar en función del tiempo de operación de la bomba, con la siguiente ecuación:

$$d_d = 1.3 \sqrt[4]{x} \sqrt{Q_b} \quad (35)$$

Dónde:

x = Razón de horas trabajo de bomba en un día.

Q_b = Caudal de bombeo.

$$x = \frac{0.033 \text{ h}}{24 \text{ h}} \quad (36)$$

$$x = 0.0014$$

Entonces con el caudal de bombeo transformado a ml/s se tiene:

$$d_d = 1.3 \sqrt[4]{0.014} \sqrt{252,33}$$

$$d_d = 7,1033 \text{ mm}$$

Con este valor en el catálogo de tubería plástica de polipropileno, se selecciona la tubería más apropiada, que sería: la serie 3, diámetro exterior de 1/2", diámetro interior 12,7 mm.

Para una correcta selección la velocidad debe estar dentro del rango admisible que es $0.6 < v < 2.4$ [m/s].

Cálculo de la velocidad de descarga (v_d) con los datos obtenidos.

$$v_d = \frac{Q_d}{A_{\text{int.tubería}}} \quad (37)$$

$$v_d = \frac{(252,33)(4)}{(\pi 1.27^2)(100)}$$

$$v_d = 1,992 \text{ m/s}$$

Como se encuentra dentro del rango se da como satisfecho el cálculo.

3.11.3 *Determinación del diámetro de succión (d_s).* De acuerdo a la ley de conservación de la masa el diámetro en la succión debe ser mayor o igual al diámetro de la descarga, nunca menor. Bajo ésta premisa se selecciona el mismo diámetro de la descarga para la succión, obteniéndose por consiguiente el mismo valor de velocidad. Fuente especificada no válida.

$$d_s = d_d \quad (38)$$

$$v_s = v_d \quad (39)$$

3.11.4 *Determinación de la altura dinámica total (H_{total}).* El conjunto motor-bomba deberá vencer la diferencia de altura existente entre el nivel del fluido libre del tanque de succión y el nivel de fluido en la descarga o tanque de almacenamiento, más las pérdidas de carga durante todo el trayecto, es decir, las perdidas primarias y las secundarias, tanto en la succión así como en la descarga. Su fórmula es:

$$H_{total} = h_d + h_s \quad (40)$$

Dónde

H_{total} Carga dinámica total en el sistema de bombeo,

h_d Carga dinámica descarga

h_s Carga dinámica en la succión.

3.11.5 *Cálculo de la carga dinámica en la descarga (h_d).* Esta pérdida viene dada por la fórmula:

$$h_d = h_{ed} + h_{vd} + H_{rd} \pm h_{pd} \quad (42)$$

Dónde:

h_{ed} = Altura estática en la descarga.

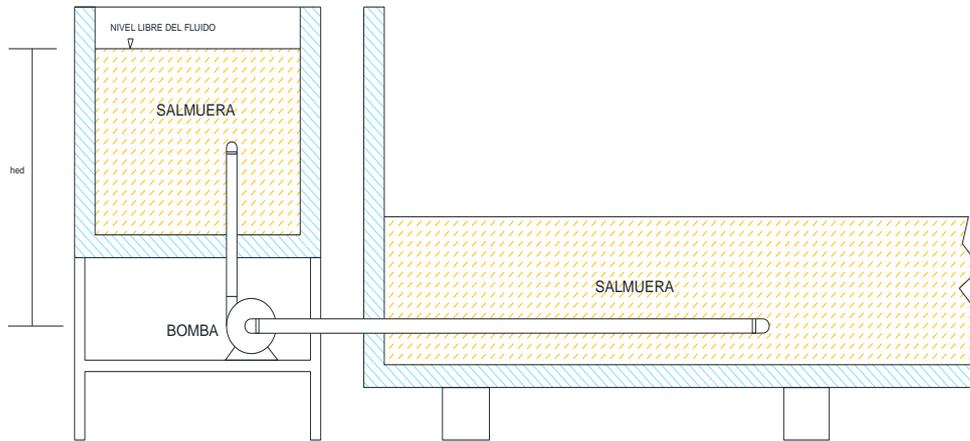
h_{vd} = Carga por velocidad en la descarga.

H_{rd} = Pérdidas en la descarga.

h_{pd} = Presión a la que se encuentra el tanque de almacenamiento.

La altura estática en la descarga viene dado por la diferencia de altura entre el nivel superior del fluido bombeado y el eje de la bomba.

Figura 22. Esquema del sistema de bombeo.



Fuente: Autores.

En este caso el valor es de $h_{ed} = 0.70 \text{ m}$

La carga por la velocidad está dada por la fórmula:

$$H_{vd} = \frac{v_d^2}{2g} \quad (43)$$

Dónde:

v_s = Velocidad del fluido en la descarga.

g = Gravedad.

Se tiene:

$$h_{vd} = \frac{(1,992)^2}{2(9.8)}$$

$$h_{vd} = 0.2022 \text{ m}$$

Para el cálculo de las pérdidas en la descarga se debe tomar en cuenta las pérdidas primarias, secundarias, las pérdidas en la descarga es la sumatoria de todas las anteriores, así:

$$H_{rd} = H_{rpd} + H_{rsd} \quad (44)$$

Las pérdidas primarias están relacionadas con el flujo a través de la tubería del fluido bombeado, para esto se usa la fórmula de Darcy-Weisback, que se define como:

$$H_{rpd} = \frac{fLv^2}{2d_dg} \quad (45)$$

Dónde:

L = Longitud de tubería del sistema.

f = Coeficiente de rugosidad:

$L = 0,3 \text{ m}$.

$$Re = \frac{d_d v_d \rho}{\mu} \quad (46)$$

Para la salmuera de cloruro de calcio se tiene los valores de:

Densidad $(\rho) = 1198 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad dinámica $\mu = 0.0048 \text{ N.s/m}^2$.

Reemplazando éstos valores y los obtenidos anteriormente en la ecuación se tiene:

$$Re = \frac{(0,0127)(1,99)(1198)}{0.0048} \left[\frac{\text{m m kg/m}^3}{\text{N.s/m}^2} \right]$$

$$Re = 49715,6353$$

La rugosidad relativa por su parte se obtiene de la relación entre la rugosidad absoluta (ε), propia para cada material, para plásticos el valor es de $\varepsilon = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$, y con el diámetro de la tubería de descarga se tiene:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{d_d} \quad (47)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1.5 \times 10^{-6}}{0.0127} \left[\frac{\text{m}}{\text{m}} \right]$$

$$\varepsilon_r = 11,811 \times 10^{-5}$$

En el diagrama de Moody que nos relaciona éstos dos valores para obtener el valor del coeficiente de fricción, donde: (ANEXO E)

$$f = 0.021$$

Una vez obtenido el coeficiente de fricción se regresa a la ecuación de Darcy-Weisback y se sustituye los valores correspondientes:

$$H_{rpd} = \frac{(0.021)(0,3)(1,992)^2}{2(0.0127)(9.8)} \left[\frac{\text{m m}^2/\text{s}^2}{\text{m m}/\text{s}^2} \right]$$

$$H_{rpd} = 0.1003 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias son causadas por los accesorios ubicados a lo largo de la tubería, se considera como accesorio a cambios de sección, válvulas, codos, ramificaciones, etc. Por este motivo hay que considerar una sumatoria de accesorios por tipo, ya que cada uno de ellos posee una caída de presión diferente llamada longitud equivalente (L_{eq}) según la ecuación: (ANEXO F)

$$H_{rsd} = \sum L_{eq} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (48)$$

Tabla 10. Pérdidas por accesorios en la descarga

Accesorios			Longitudes equivalentes (m)	
Cantidad	Descripción	Diámetro	Unitaria	Total
3	Codo 90°	1/2 in	0,50	1,50
1	Válvula check	1/2 in	1,70	1,70
1	Salida tanque	1/2 in	0,4	0,4

Fuente: Autores.

Por consiguiente:

$$H_{rsd} = (1,50 + 1,70 + 0,40) \left(\frac{1,99^2}{2(9.8)} \right)$$

$$H_{rsd} = 0,728 \text{ m}$$

La pérdida total en la descarga será:

$$H_{rd} = H_{rpd} + H_{rsd} \quad (49)$$

$$H_{rd} = 0,1003 + 0,728 \text{ [m]}$$

$$H_{rd} = 0,8284 \text{ m}$$

Como en este caso el tanque de descarga está abierto a la atmósfera se considera que la presión a la que está sujeto el tanque en la superficie es cero, entonces:

$$h_{pd} = 0$$

Finalmente con todos los valores en la descarga calculados se obtiene:

$$h_d = h_{ed} + h_{vd} + H_{rd} \pm h_{pd} \quad (50)$$

$$h_d = 0.70 + 0.2022 + 0,8284 + 0 \text{ [m]}$$

$$h_d = 1,7306 \text{ m}$$

3.11.6 *Cálculo de la carga dinámica en la succión.* Ésta carga al igual que la descarga viene dada por una ecuación muy similar.

$$h_s = h_{es} + h_{vs} + H_{rs} \pm h_{ps} \quad (51)$$

Dónde:

h_{es} = Altura estática en la succión.

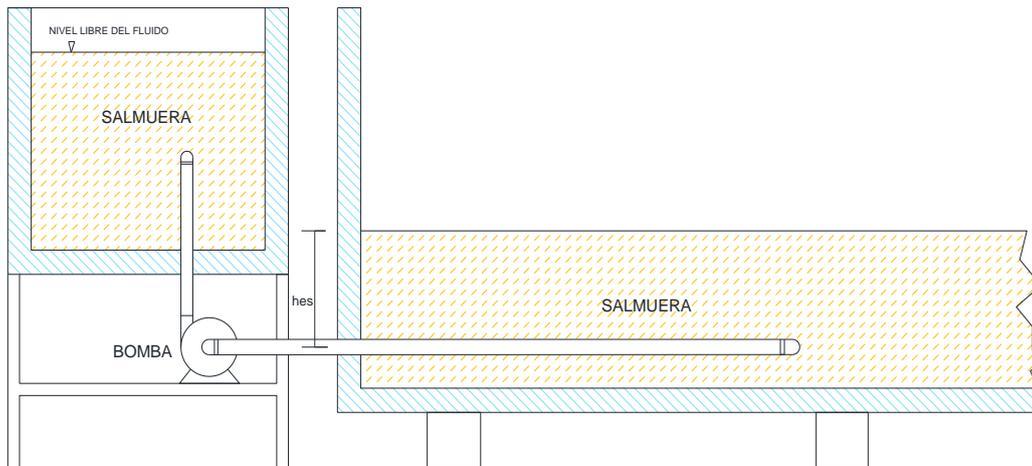
h_{vs} = Carga por velocidad en la succión.

H_{rs} = Pérdidas en la succión.

h_{ps} = Presión a la que se encuentra el tanque de almacenamiento.

La altura estática en la succión h_{es} viene dado por la diferencia de altura entre el eje de la bomba y el nivel del fluido a ser bombeado, en este caso es negativa puesto que el nivel de donde va ser bombeado está sobre la bomba, manteniéndola incluso cebada.

Figura 23. Esquema de la cabeza estática de succión



Fuente: Autores.

Por lo tanto $h_{es} = -0.25 \text{ m}$.

Para la carga por velocidad se la calcula con la misma ecuación que se usó para la descarga:

$$h_{vs} = \frac{v_s^2}{2g} \quad (52)$$

$$h_{vd} = \frac{(1,992)^2}{2(9.8)}$$

$$h_{vd} = 0.2022 \text{ m}$$

Para el cálculo de las pérdidas en la succión se debe tomar en cuenta las pérdidas primarias, secundarias, las pérdidas en la succión es la sumatoria de todas las anteriores, así:

$$H_{rs} = H_{rps} + H_{rss} \quad (53)$$

Las pérdidas primarias están relacionadas con el flujo a través de la tubería del fluido bombeado, para esto se usa la fórmula de Darcy-Weisback, que se define como:

$$H_{rpd} = \frac{fLv^2}{2d_dg} \quad (54)$$

Dónde:

L = Longitud de tubería del sistema.

f = Coeficiente de rugosidad:

$L = 1,1 \text{ m}$.

$$\text{Re} = \frac{d_d v_d \rho}{\mu} \quad (55)$$

Para la salmuera de cloruro de calcio se tiene los valores de:

Densidad $(\rho) = 1198 \text{ kg/m}^3$

Viscosidad dinámica $\mu = 0.0048 \text{ N.s/m}^2$.

Reemplazando éstos valores y los obtenidos anteriormente en la ecuación se tiene:

$$\text{Re} = \frac{(0,0127)(1,99)(1198)}{0.0048} \left[\frac{\text{m m kg/m}^3}{\text{N.s/m}^2} \right]$$

$$\text{Re} = 49715,6353$$

La rugosidad relativa por su parte se obtiene de la relación entre la rugosidad absoluta (ε), propia para cada material, para plásticos el valor es de $\varepsilon = 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$, y con el diámetro de la tubería de descarga se tiene:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{d_d} \quad (56)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1.5 \times 10^{-6}}{0.0127} \left[\frac{\text{m}}{\text{m}} \right]$$

$$\varepsilon_r = 11,811 \times 10^{-5}$$

En el diagrama de Moody que nos relaciona éstos dos valores para obtener el valor del coeficiente de fricción, donde: (ANEXO E)

$$f = 0.021$$

Una vez obtenido el coeficiente de fricción se regresa a la ecuación de Darcy-Weisback y se sustituye los valores correspondientes:

$$H_{rps} = \frac{(0.021)(1,1)(1,992)^2}{2(0.0127)(9.8)} \left[\frac{\text{m m}^2/\text{s}^2}{\text{m m}/\text{s}^2} \right]$$

$$H_{rps} = 0,3678 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias son causadas por los accesorios ubicados a lo largo de la tubería, se considera como accesorio a cambios de sección, válvulas, codos, ramificaciones, etc. Por este motivo hay que considerar una sumatoria de accesorios por tipo, ya que cada uno de ellos posee una caída de presión diferente llamada longitud equivalente (L_{eq}) según la ecuación: (ANEXO F)

$$H_{rss} = \sum L_{eq} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (57)$$

Tabla 11. Pérdidas por accesorios en la descarga

Accesorios			Longitudes equivalentes (m)	
Cantidad	Descripción	Diámetro	Unitaria	Total
2	Codo	$3/4 \text{ in}$	0.45	0,90
1	Válvula de compuerta	$3/4 \text{ in}$	0,21	0,21
1	Salida tanque	$3/4 \text{ in}$	0.5	0.5
1	ampliación	$1/2 \text{ a } 3/4$	0.3	0.3

Fuente: Autores.

Por consiguiente:

$$H_{rss} = (0,90 + 0,21 + 0,5 + 0,3) \left(\frac{1,99^2}{2(9.8)} \right)$$

$$H_{rss} = 0,3863 \text{ m}$$

La pérdida total en la descarga será:

$$H_{rs} = H_{rps} + H_{rss} \quad (58)$$

$$H_{rs} = 0,3678 + 0,3863 \text{ [m]}$$

$$H_{rs} = 0,7541 \text{ m}$$

Como en este caso el tanque de almacenamiento está abierto a la atmósfera se considera que la presión a la que está sujeto el tanque en la superficie es cero, entonces:

$$h_{pd} = 0$$

Finalmente con todos los valores en la succión calculados se obtiene:

$$h_s = h_{es} + h_{vs} + H_{rs} \pm h_{ps} \quad (59)$$

$$h_s = -0.25 + 0.2022 + 0,7541 + 0 \text{ [m]}$$

$$h_s = 0,70635 \text{ m}$$

La manera negativa de presentarse ésta carga es porque ayuda al sistema al estar el nivel del fluido por encima del eje de la bomba.

La altura dinámica total será:

$$H_{total} = h_d + h_s \quad (60)$$

$$H_{total} = 1,7306 - 0,70635 \text{ [m]}$$

$$H_{total} = 1,024 \text{ m}$$

El cálculo de *NPSH* su acrónimo en inglés Net Positive Suction Head (cabeza neta positiva de succión) en este caso no aplica, ya que se lo calcula.

$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\gamma} + h_{es} - H_{rs} + \frac{P_{vapor}}{\gamma} \quad (61)$$

El agua al pasar a través de la bomba lo hace a altas velocidades, lo cual provoca una caída de la presión de entrada. En el seno del líquido aparece una presión que se llama presión de vapor, que está directamente relacionada con la temperatura del agua, como en este caso no se usa agua sino salmuera de calcio, siendo su rango de temperatura

de trabajo entre -10°C y -8°C , muy por debajo del punto de evaporación de la salmuera.

Figura 24. Bomba centrífuga CHUGGER



Fuente http://www.homebrewing.org/Chugger-Pump-Stainless-Steel-Center_p_3193.html

La selección se la realiza en función a dos parámetros el caudal de bombeo y la altura total de bombeo.

$$Q_b = 15,14 \text{ l/min}$$

$$H_{\text{total}} = 1,024 \text{ m}$$

Con estos datos y el catálogo de bombas, se seleccionó la bomba.

Tabla 12. Características de la bomba seleccionada

Bomba seleccionada	
Equipo	Bomba centrífuga CHUGGER
Modelo	Chugger SS-C
Potencia	0.04 HP - 0.029 KW
Voltaje	115V 50/60HZ
Material	Carcaza: Acero inoxidable 316 Rodete: Polipropileno
Caudal máximo	7 gpm – 22,7 lpm
Temperaturas de funcionamiento	Min. -10°C Máx. 40°C
Altura máxima	18.6 ft. - 4.1 m

Fuente: Autores

3.12 Diseño del tanque

La función principal del tanque o reservorio será el de albergar el refrigerante secundario, además de ser el lugar donde se generaran los bloques de hielo.

Para el diseño del tanque se debe tomar en cuenta la resistencia a la deformación del material a la presión por el fluido que estará albergado y el aislamiento necesario que debe tener para evitar pérdidas por convección con el ambiente.

3.12.1 Características necesarias en el tanque. Las características necesarias para que el tanque trabaje de manera eficiente se resumen de la siguiente forma:

Condiciones de Transferencia de calor.

- Debe tener un aislante adecuado para trabajar a bajas temperaturas de un espesor tal que minimice en su totalidad las pérdidas de calor por convección de las paredes con el ambiente.
- La conductividad térmica de los materiales que componen el tanque debe ser baja.

Condiciones de construcción

- Las dimensiones y la forma del tanque tendrán que estar en relación con la cantidad y dimensiones de los moldes, dejando un espacio suficiente para no interrumpir la circulación de refrigerante entre los moldes
- La resistencia a la deformación del material del que está compuesto el tanque debe ser buena.
- El tanque debe ser resistente a la corrosión.
- No debe existir fugas de agua.
- Condiciones de mantenimiento.
- Debe ser de fácil limpieza y desmontaje.

- Tener facilidad para evacuar el agua que se encuentra en su interior.
- Considerando las condiciones antes mencionadas, se ha diseñado un tanque con las siguientes especificaciones:

3.12.2 Material y dimensiones del tanque. El tanque se construirá en acero inoxidable utilizando espuma de poliuretano como aislante por su baja conductividad térmica y su buen desempeño a bajas temperaturas.

Las dimensiones internas del tanque se realizaron de tal forma que no intervenga con la formación de hielo, como se puede observar en la tabla 13. Las dimensiones externas dependerán del espesor del aislante (2in), el cual se calculó tratando de obtener las menores pérdidas de calor posibles por paredes, techo y piso en el capítulo anterior.

Se calcula el espesor de placa de acero inoxidable a utilizar mediante la ecuación:

$$t = 2,45L \sqrt{\frac{\alpha * H * 0,36G}{\sigma y}}$$

Dónde:

L = Largo del recipiente, en m.

H = Altura del recipiente, en m.

G_e = Gravedad específica del líquido

σy = Esfuerzo del acero inoxidable, en kpsi.

α_1 = Factor que depende de la relación de la longitud y la altura del tanque (H/L).

Las dimensiones del tanque son:

Tabla 13. Dimensiones del tanque

REQUERIMIENTOS	L(m)	A(m)	H(m)
Dimensiones externas	0,56	0,30	0,60
Dimensiones internas	0,46	0,20	0,55

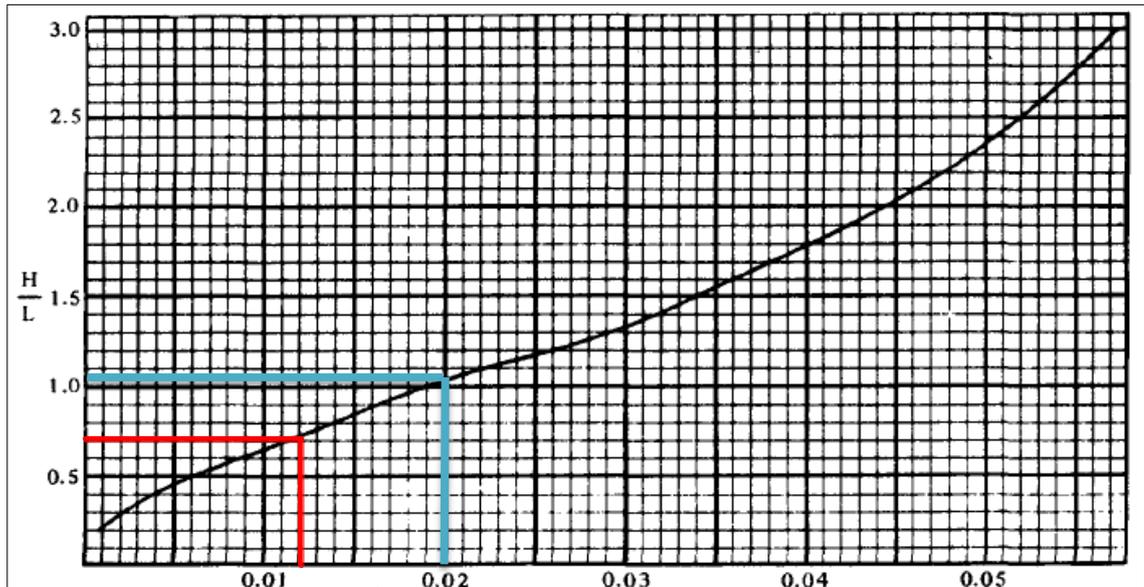
Fuente: Autores

Relación de longitud – altura:

$$\frac{H}{L} = \frac{0,60}{0,56} = 1,072$$

Con la relación calculada se halla el valor de α en la figura 28

Figura 25. Relación longitud - altura



Fuente: http://www.docentes.utonet.edu.bo/mruizo/wpcontent/uploads/PáginasTanques_rectangulares.pdf

Para la relación $\frac{H}{L} = 1,072$ le corresponde un valor de $\alpha = 0,0195$

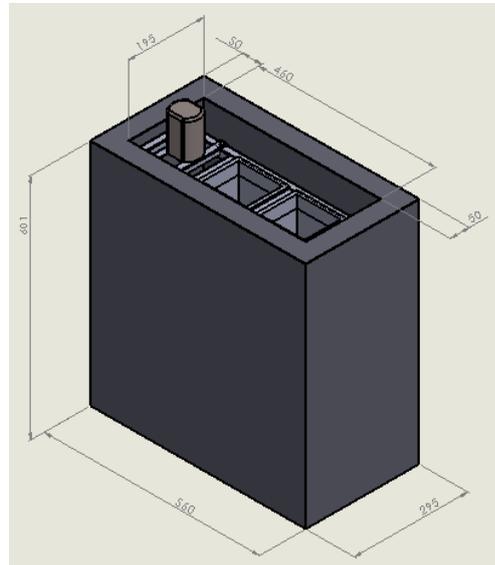
$$t = 2,45(22,0472\text{in}) \sqrt{\frac{0,0195 * 23,622 * 0,036(1,106)}{75800}} = 0,0259\text{in} = 0,6574\text{mm}$$

El espesor de la placa debe ser de 0,66mm, pero se selecciona un espesor de 1,5 mm, ya que este espesor de plancha se encuentra en el mercado y menor deformación en el proceso de corte y soldadura.

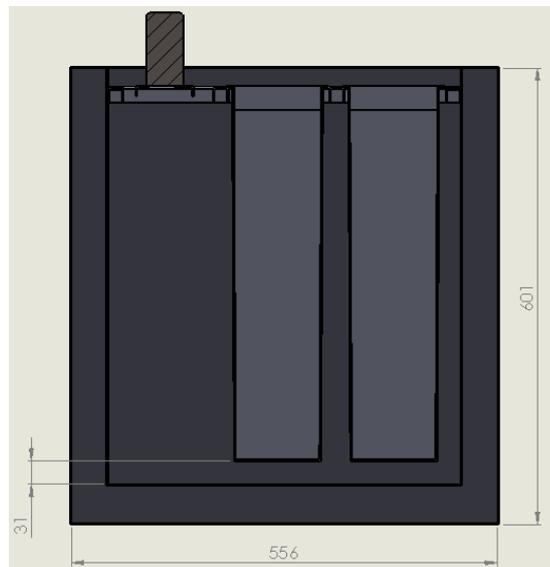
Aunque existe posibilidad de expansión y contracción con los cambios de temperatura, no significa que va a disminuir en tamaño.

Las especificaciones de dimensionamiento y materiales del tanque se observan a continuación:

Figura 26. Disposición y dimensiones del tanque



Vista Isométrica



Vista de Sección

Fuente: Autores

3.12.3 Estudio de resistencia a cargas externas. Para observar el comportamiento que tiene el tanque ante cargas externas, como la presión por columna de agua, se ha creado un estudio de simulación con la ayuda del programa Solid Works.

En dicho programa se crea cada componente del tanque y luego se lo ensambla, especificando el material de cada componente y la forma de unión de cada parte.

La carga actuante es la presión generada por columna de agua, la cual se determina por la siguiente ecuación:

$$P = \rho gh \quad (62)$$

Dónde:

$P =$ Presión, en $\frac{N}{m^2}$.

$\rho =$ Densidad del agua, en $\frac{Kg}{m^3}$.

$g =$ Aceleración de la gravedad, en $\frac{m}{s^2}$.

$h =$ Altura de columna de agua, en m.

Reemplazando datos se obtiene:

$$P = 1198 \frac{Kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * h$$

$$P = (11752,38 * h) \frac{N}{m^3}$$

Mientras va aumentando la profundidad del tanque el valor de h aumenta y por tanto la presión actuante sobre las paredes del tanque también. Se ingresa la ecuación en el estudio de SolidWorks de tal manera que el valor de P varíe con respecto a h.

La presión que existirá en el fondo del tanque será constante y se calcula de la siguiente manera:

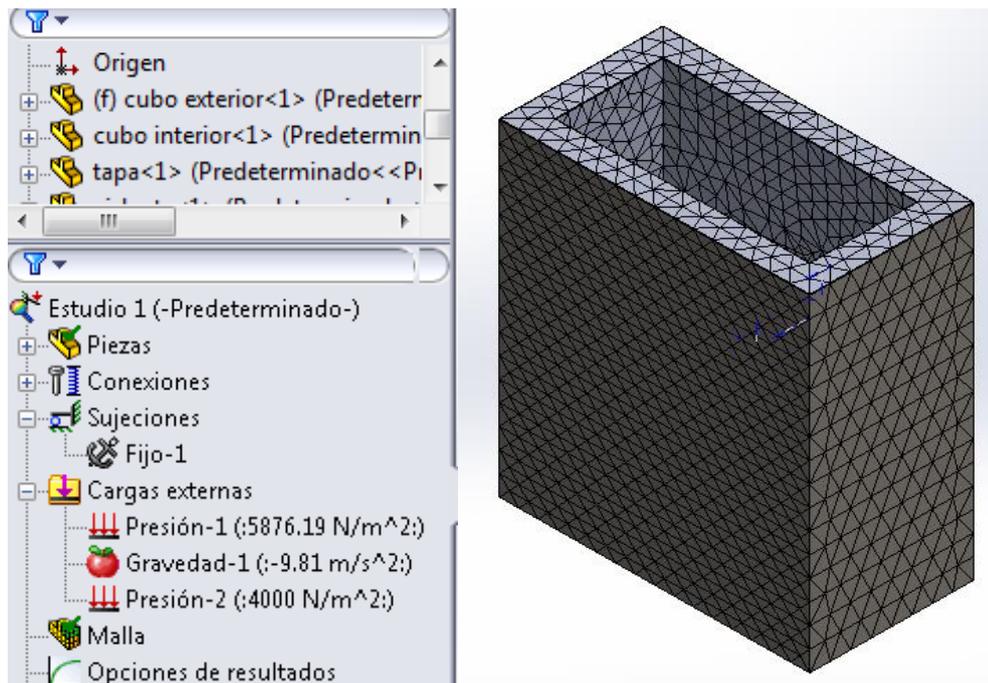
Para $h = 0,5m$

$$P = (11752,38 * 0,5) \frac{N}{m^2} = 5876,19 \frac{N}{m^2}$$

El valor de esta presión distribuida también se ingresa en el estudio.

Luego de especificar los componentes, conexiones, sujeciones, cargas actuantes y el mallado como se observa en la figura 27 se procede a ejecutar el estudio.

Figura 27. Estudio de simulación del tanque



Fuente: Autores

Una vez finalizado el estudio se crean las siguientes figuras resultantes:

Análisis estático nodal tipo: Tensión de Von Mises. Basándose en la teoría de Von Mises-Hencky también conocida como teoría de la energía de cortadura, se conoce que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de Von Mises es igual al límite de tensión.

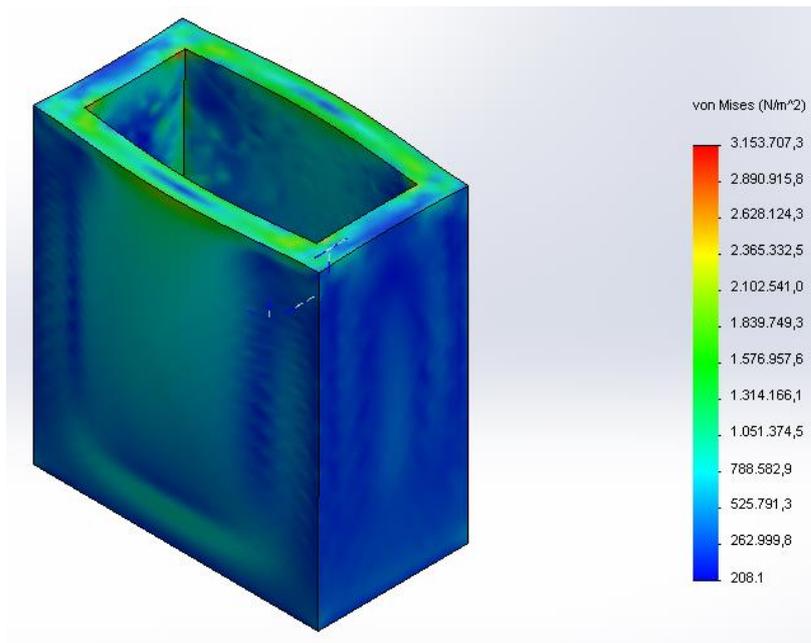
El software utiliza el límite de tensión de tracción/ruptura o establece su propio límite de tensión para realizar este cálculo.

En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión. La tensión mínima existente fue de $208,1 \frac{N}{m^2}$, mientras la tensión máxima fue de $3153707,3 \frac{N}{m^2}$. Los resultados se observan en la figura 28.

Como la tensión máxima existente es menor que el límite elástico del acero inoxidable no existe deformación permanente.

$$3153707,3 \frac{N}{m^2} < 234421748 \frac{N}{m^2}$$

Figura 28. Tensión de Von Mises tanque

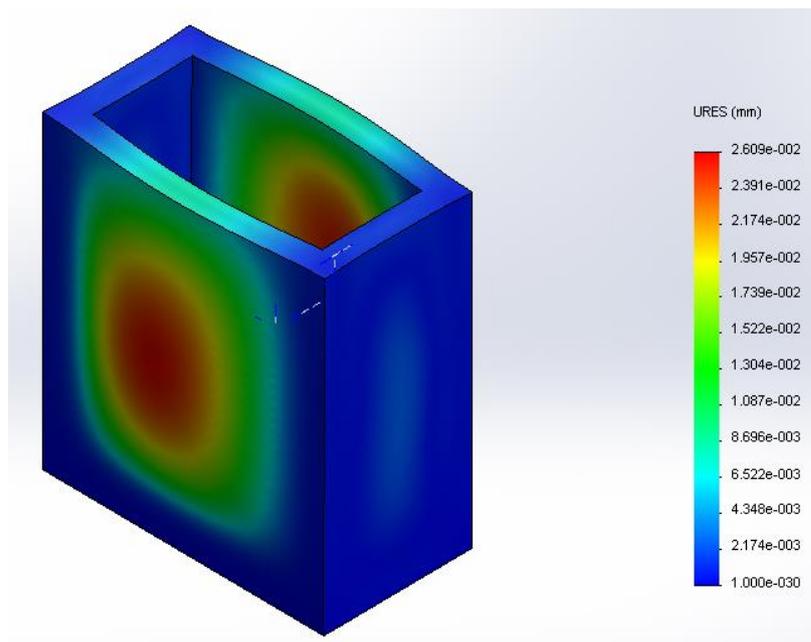


Fuente: Autores

Desplazamiento resultante. Con este análisis se puede observar cuanto se ha desplazado un nodo de un objeto, en dirección normal a su superficie.

El mínimo desplazamiento nodal existente fue de 0mm, mientras que el máximo desplazamiento nodal fue de 0,026088 mm. Los resultados se observan en la figura 29.

Figura 29. Desplazamiento estático resultante



Fuente: Autores

Deformación unitaria equivalente. La deformación unitaria se define como el cambio de longitud por unidad de longitud, como la deformación ocurre de distintas formas y en distintas direcciones distorsionando la forma del objeto, es necesario calcular la deformación unitaria equivalente.

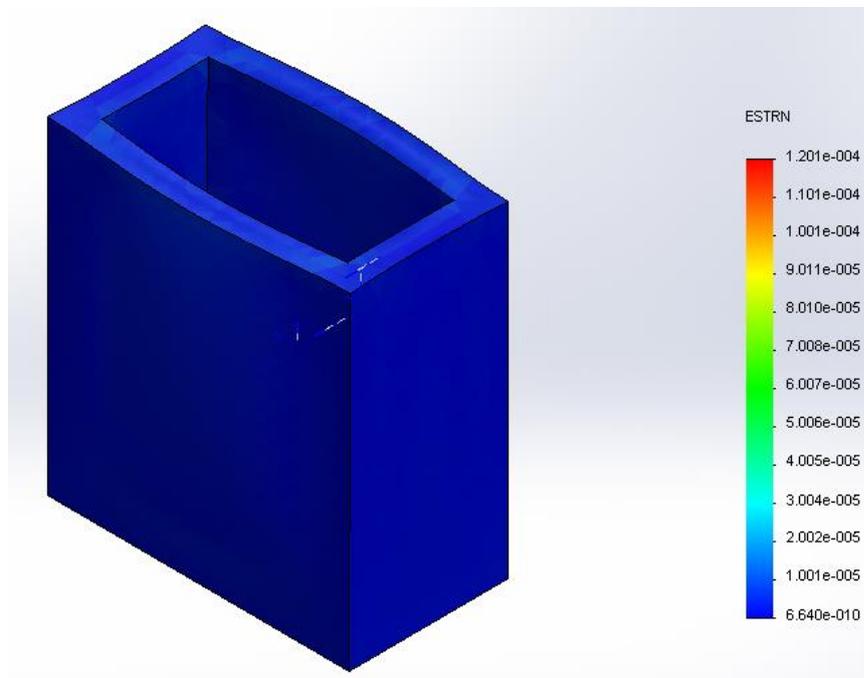
Este es el resultado de cálculos en los que intervienen las deformaciones unitarias normales en el sentido de cada uno de los ejes de referencia y las deformaciones unitarias cortantes en dirección de los ejes.

La mínima deformación unitaria equivalente es de $6,64021e-010$, mientras que la máxima deformación es $0,000120143$. Los resultados se observan en la figura 30.

Por último el programa presenta una vista deformada del tanque, la cual se observa en la figura 31.

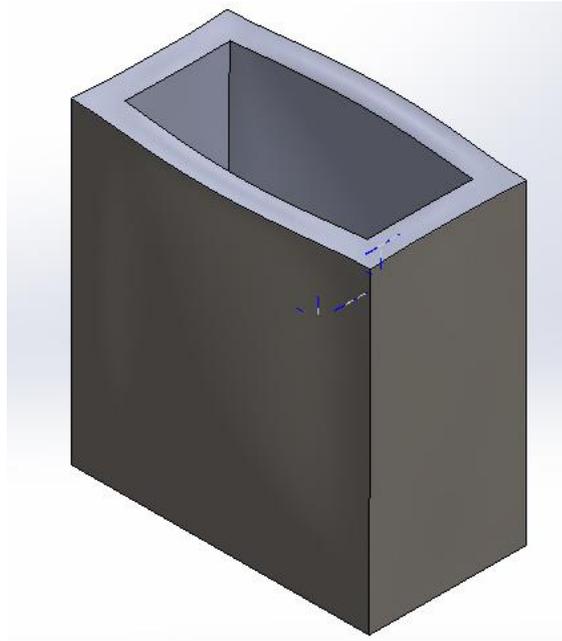
Esta figura indica que no hay deformación considerable ni permanente en el tanque, por lo cual el diseño del tanque es satisfactorio.

Figura 30. Deformación unitaria equivalente



Fuente: Autores

Figura 31. Vista deformada del tanque



Fuente: Autores

3.13 Diseño de la estructura

Se define a la estructura como un ensamblaje de elementos que mantiene su forma y su unidad, cuyo objetivo es resistir cargas resultantes de su uso y de su peso propio y darle forma a un cuerpo o equipo.

Para el diseño de la estructura se toma en cuenta las dimensiones del tanque reservorio y la caja de control.

Una estimación inicial acerca de los perfiles estructurales que lo conforman se lo realiza en base a la carga que va a soportar, los efectos por fatiga y el ambiente en el que se va a encontrar.

3.13.1 *Características necesarias en la estructura.* Las características necesarias para que la estructura cumpla con los objetivos mencionados se resumen de la siguiente forma:

Condiciones de construcción Las dimensiones y la forma de la estructura tendrán que estar en relación con la forma y dimensiones de cada uno de los elementos que conforman el generador, para un fácil ensamblaje.

La caja de control debe estar a un costado del tanque a una altura en la que sea fácilmente manejable.

El material de la estructura debe tener buenas propiedades mecánicas.

Debe resistir a la corrosión.

Condiciones de mantenimiento.

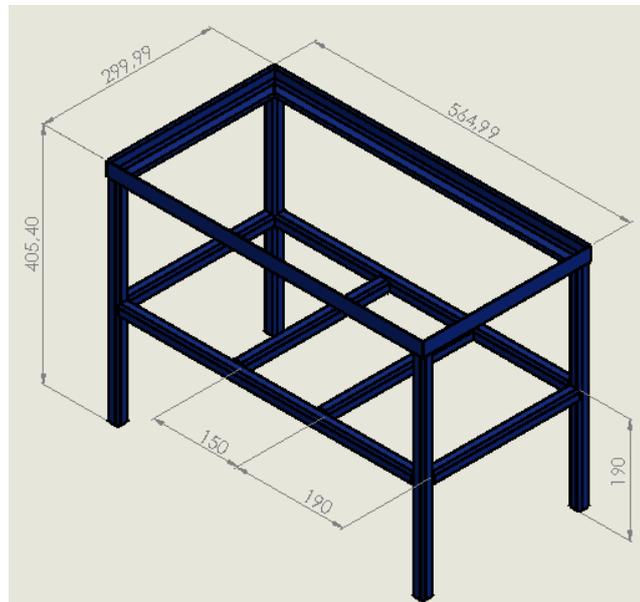
Debe ser de fácil limpieza.

Permitir un desmontaje sencillo de los elementos que conformen el equipo.

Material y dimensiones de la estructura. La estructura se construirá con tubo estructural ASTM A-36 de 1 in y 1,5 mm de espesor, recubierto con pintura para evitar la corrosión del material.

Las dimensiones de la estructura se muestran en la figura 32.

Figura 32. Dimensiones de la estructura



Fuente: Autores

3.13.2 *Estudio de resistencia a cargas externas.* La estructura es la que soportará el peso del tanque y demás elementos, es así que, como en el caso del diseño del tanque, aquí también se hace necesario realizar un estudio a cargas estáticas externas.

Para este estudio se consideran las siguientes cargas:

- Peso del tanque y accesorios = 33,457 Kg.
- Masa de salmuera y agua en el tanque = 45,7958 Kg.
- Peso de la caja de control más accesorio = 12 Kg.

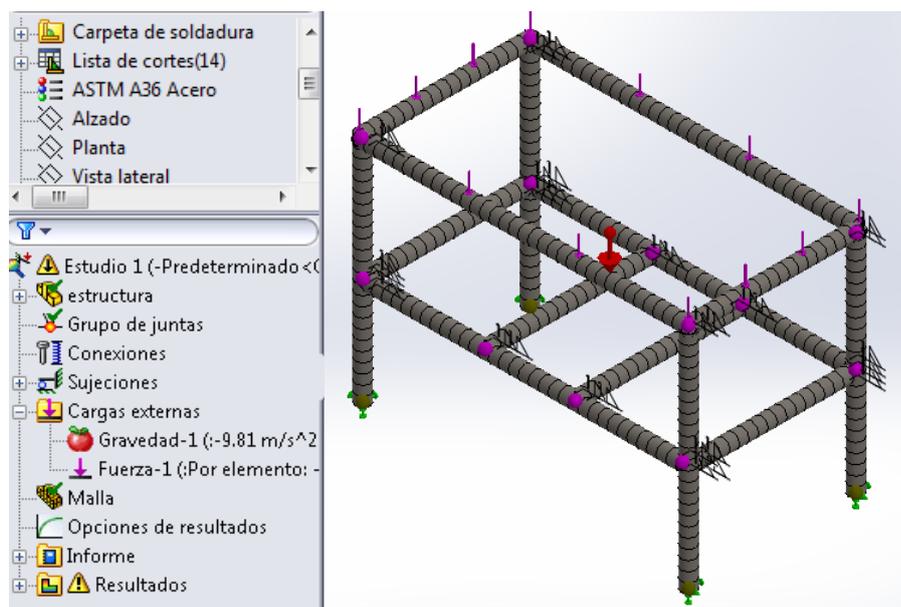
Efectos de gravedad

Se utilizará el software Solid Works para realizar el estudio, especificando los siguientes datos:

- Componentes: miembros estructurales que conforman la estructura.
- Juntas: se calculan todas las juntas presentes en la estructura.
- Conexiones: contacto global entre componentes.
- Sujeciones: Geometría fija ubicada en las juntas de las bases de la estructura.
- Cargas externas: los pesos antes mencionados.

Se procede a realizar el mallado como se ve en la figura 46 y se produce un nuevo estudio.

Figura 33. Mallado de la estructura



Fuente: Autores

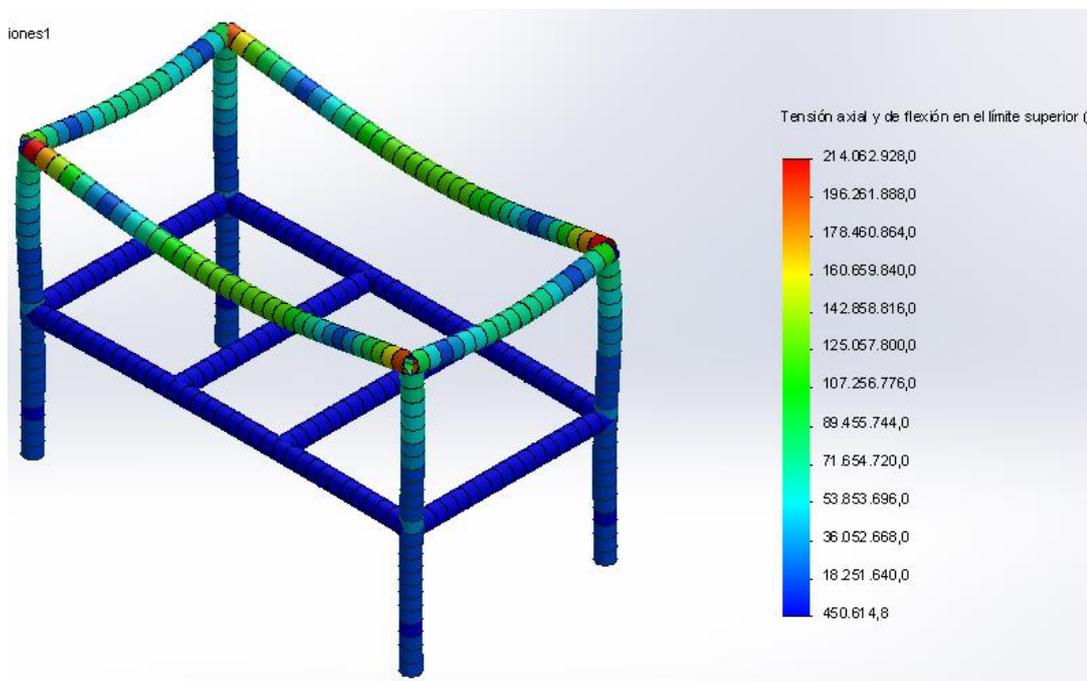
Después de realizado el estudio se crean las siguientes gráficas resultantes:

Análisis estático nodal tipo: tensión de Von Mises. La tensión mínima existente fue de $450614,8 \frac{N}{m^2}$, mientras la tensión máxima fue de $214\ 062\ 928 \frac{N}{m^2}$. Los resultados se observan en la figura 34.

Como la tensión máxima existente es menor que el límite elástico del acero estructural no existe deformación permanente.

$$214\ 062\ 928 \frac{N}{m^2} < 350\ 000\ 000 \frac{N}{m^2}$$

Figura 34. Tensión de Von Mises estructura

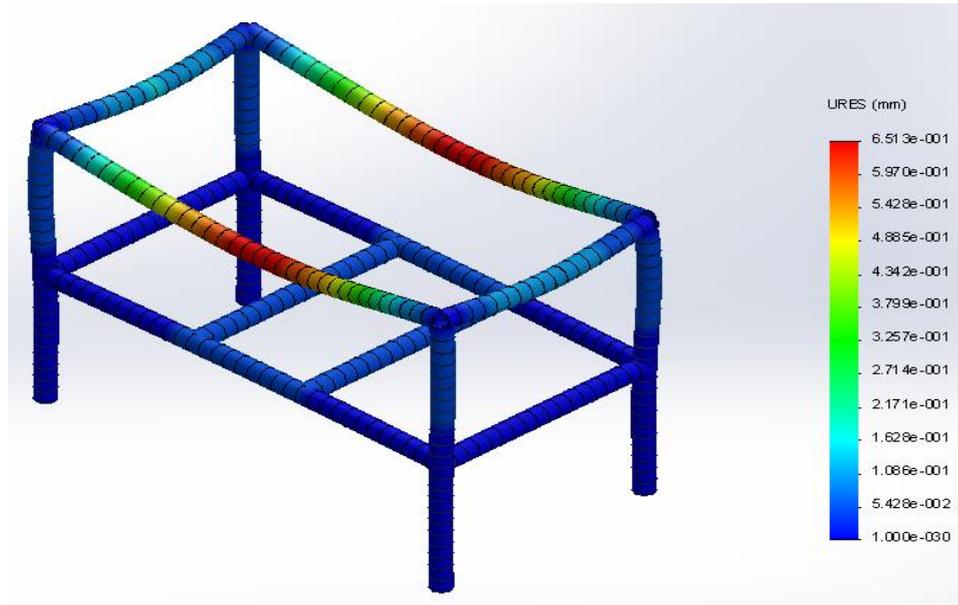


Fuente: Autores

Desplazamiento resultante. El mínimo desplazamiento nodal existente fue de 0 mm, mientras que el máximo desplazamiento nodal fue de 0.651311 mm. Los resultados se observan en la figura 35.

Se ilustra los resultado del desplazamiento en base a colores, siendo el color rojo el máximo desplazamiento del elemento y el color azul indica el menor desplazamiento del elemento de la estructura.

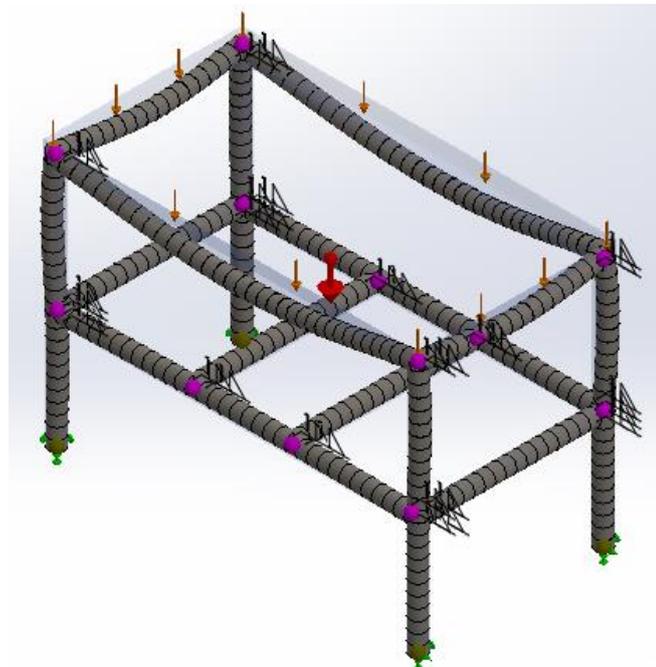
Figura 35. Desplazamiento estático resultante - análisis estático: estructura



Fuente: Autores

Por último el programa presenta una vista deformada de la estructura, la cual se observa en la figura 36.

Figura 36. Vista deformada de la estructura - análisis estático: estructura



Fuente: Autores

Cálculo de la flecha admisible. Para corroborar los datos obtenidos por medio del software se procede a calcular la flecha admisible $[\gamma]$ la cual se define como la flecha

máxima a la que puede encontrarse la viga. P. A. Stiopin menciona en su libro Resistencia de Materiales- 3ra ed. una fórmula para el cálculo de la flecha admisible para el caso de construcción de maquinaria.

Así la flecha admisible se define como:

$$[y] = \left(\frac{1}{1000} \div \frac{1}{300} \right) l \quad (63)$$

Donde:

y = Flecha admisible, en mm.

l = Luz de la viga, en mm.

La flecha admisible varía en un diapasón bastante amplio según se al destino de la pieza, en nuestro caso se selecciona un valor promedio, transformando la ecuación anterior en la siguiente:

$$[y] = \left(\frac{1}{600} \right) l \quad (64)$$

Para el caso de diseño el valor máximo de desplazamiento es de 0,751377 mm, ubicado en el miembro estructural pintado en color rojo en la figura 29, cuya luz es de 60 cm

Aplicando la ecuación se obtiene una flecha máxima admisible en ese miembro estructural de:

$$[y] = \left(\frac{1}{600} \right) 600 \text{ mm}$$

$$[y] = 1 \text{ mm}$$

Como la flecha admisible es mayor a la flecha registrada en el análisis estático, el diseño realizado es satisfactorio.

3.14 Diseño del agitador

Para el diseño del agitador se debe tomar en cuenta el tipo de flujo que se desea obtener, el fluido en el cual trabajara y la finalidad.

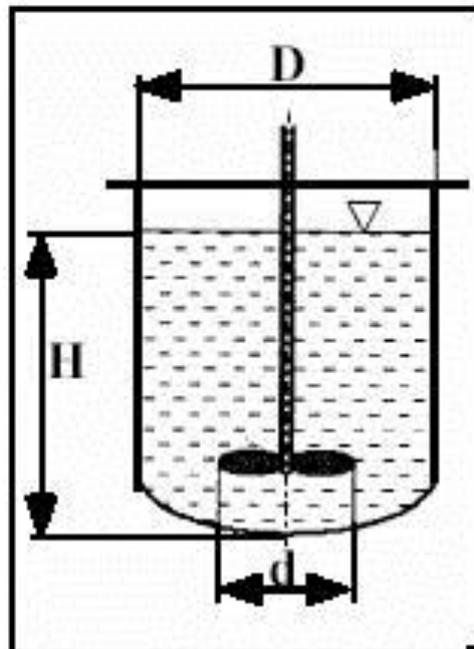
Considerando lo anterior se seleccionó el siguiente tipo de agitador

Tabla 14. Agitador de hélice

Descripción	- 3 álabes (generalmente) - ángulo de inclinación del aspa constante
Campo de flujo generado	axial
Régimen alcanzado	turbulento
Velocidad tangencial	3 - 15 m/s
Viscosidad del medio	< 8 Pa*s
Posición del rodete (d_2 / d_1)	0,1 – 0,5 (alejado de la pared)
Aplicaciones	- homogeneizar - suspender - favorecer el intercambio de calor

Fuente: <http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAgitacion/index.htm>

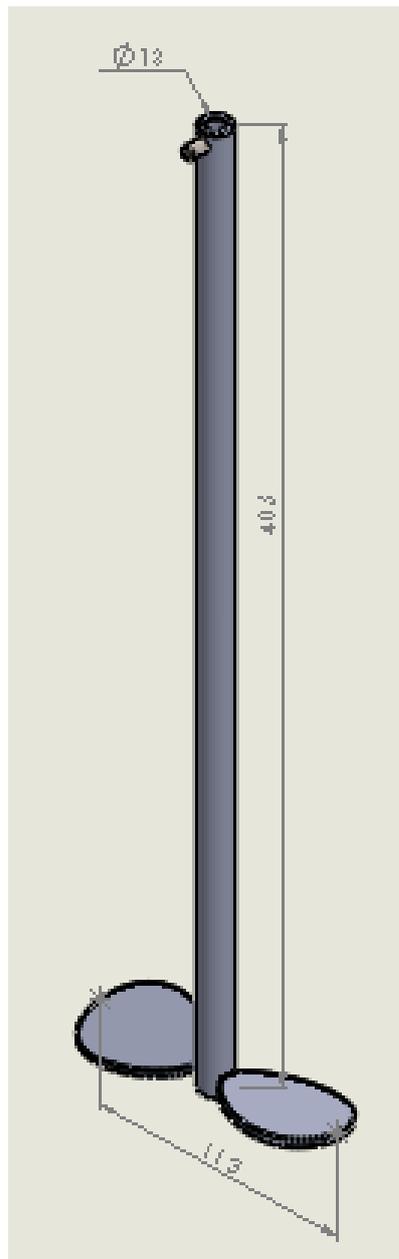
Figura 37. Esquema del agitador



Fuente: <http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAgitacion/index.htm>

El agitador se lo construyo con dos hélices considerando el tamaño del tanque y en si las dimensiones que tendría cada una de las aspas (espesor 3 mm) del agitador, está construido en acero AISI 316, sus dimensiones se muestran a continuación:

Figura 38. Dimensiones del agitador



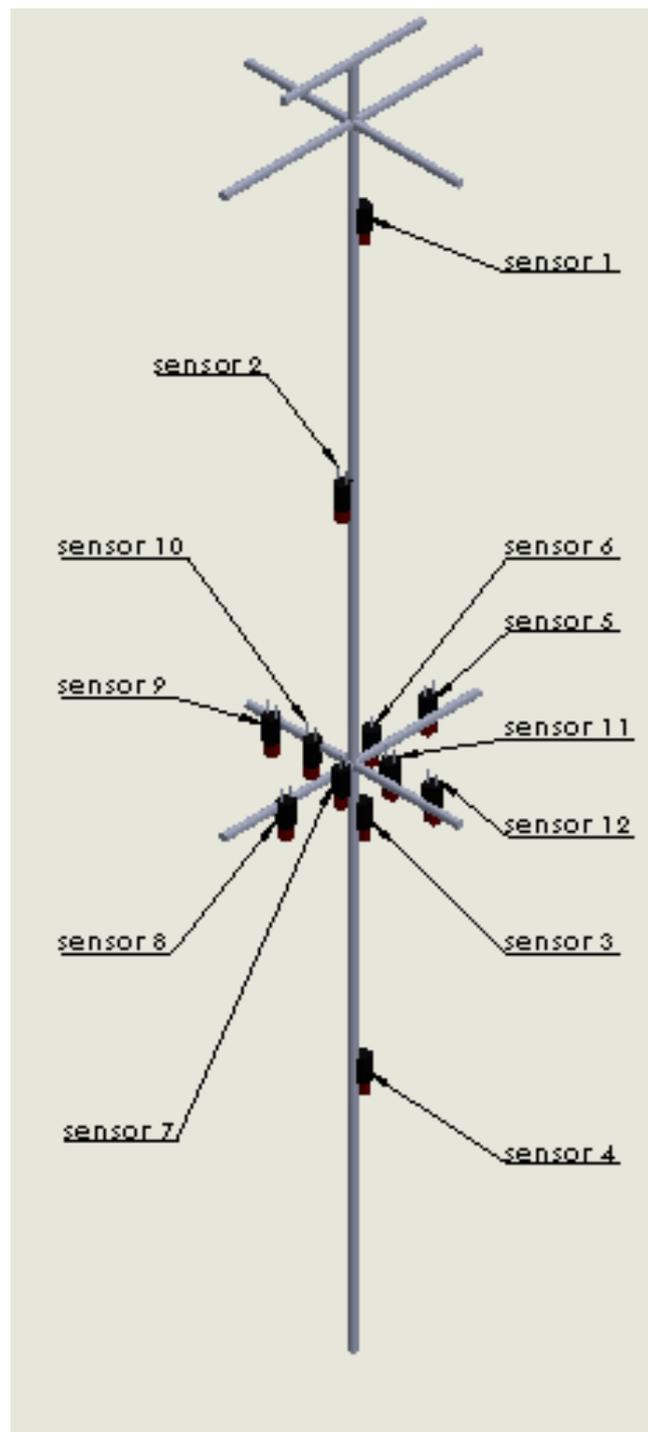
Fuente: Autores

3.15 Diseño de la matriz de sensores

Se consideraron los tres ejes o las tres dimensiones para el diseño de la matriz de sensores, es así que se decidió colocar cuatro sensores en cada dirección, en total son doce. El material del soporte de los sensores es acero AISI 1020.

Las distancias entre cada sensor se la determino de manera que se cubra toda la distancia de la pared del molde al centro del mismo, en la siguiente figura se muestran la distribución. Las dimensiones se presentan en los planos.

Figura 39. Distribución de sensores en la matriz



Fuente: Autores

3.16 Selección de los elementos para el sistema de control automático

Se considera al sistema de control automático como un conjunto de componentes físicos conectados entre sí, de tal forma que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, sin necesidad de que agentes exteriores incluyendo el factor humano intervengan.

Actualmente toda planta industrial presenta una parte actuadora, que es el sistema físico que realiza la acción, y otra parte de control, que se encarga de generar órdenes necesarias para que esa acción se lleve o no a cabo.

De igual forma se hace necesario implementar un sistema de control automático para facilitar el funcionamiento del generador de hielo.

Elementos del sistema de control automático. Todo sistema de control automático debe tener los siguientes elementos:

Sensor.- Se encarga de detectar las variaciones de la señal de salida y, a través del bucle de realimentación, envía la información detectada a un comparador.

Comparador.- Se encarga de comparar la señal de salida, captada por el sensor, con la señal de entrada. Si existe diferencia entre ambas, este produce una señal de error, y la envía al controlador.

Controlador.- Interpreta el error que se ha producido y actúa para anularlo.

Actuador.- Actúa sobre la máquina o proceso modificando su funcionamiento, según las órdenes del controlador

Luego de conocer los elementos que intervienen en el sistema de control se puede seleccionar los elementos necesarios para cumplir con el trabajo de generar hielo en bloques de manera autónoma.

3.16.1 *Controlador digital de temperatura.* Para el control de temperatura del tanque con salmuera en función de la temperatura se seleccionó el dispositivo TC-900Ri plus.

El TC-900Ri plus es un controlador digital de temperatura para congelados cuyo objetivo es automatizar los procesos de deshielo de acuerdo con las necesidades de cada instalación, proporcionando gran economía de energía.

El dispositivo cuenta con un sensor de temperatura tipo I, el cual viene encapsulado para evitar el deterioro temprano del sensor

Figura 40. TC-900Ri plus - Controlador digital para refrigeración y deshielo



Fuente: <http://www.fullgauge.com/es/PDF/TC-900RiPower.pdf>

Este dispositivo funciona con un sensor, el cual está incluido en la compra del controlador, el cual mide la temperatura en el tanque, manteniéndola dentro de los parámetros establecidos en su programación.

Tabla 15. Características del controlador de temperatura

Alimentación:	TC-900Ri power: 115 ó 230Vac $\pm 10\%$ (50/60 Hz)
Temperatura de control:	-50 hasta 75 °C / -58 hasta 167°F
Temperatura de operación:	0 hasta 40 °C / 32 hasta 104°F
Humedad de operación:	10 hasta 90%HR (sin condensación)
Resolución:	0,1°C entre -10 y 75,0 °C y 1°C entre -50 y -10°C 1°F en todo el rango
Corriente máxima:	COMP: (compresor, válvula solenoide o contactor)
DEFR:	10A/ 240Vac 1/4HP (deshielo-resistencia o gas caliente)
FANS:	5(3) A / 240Vac 1/8HP (forzadores del evaporador)
Dimensiones:	71 x 28 x 71mm
Sensor:	Sensor de ambiente (negro)

Fuente: <http://www.fullgauge.com/es/PDF/TC-900RiPower.pdf>

3.16.2 Sensor de nivel Un interruptor de flotador es un dispositivo utilizado para detectar el nivel de líquido en un tanque. El interruptor puede accionar una bomba, un indicador, una alarma u otro dispositivo.

Figura 41. Sensor de nivel



Fuente: <https://tallerarduino.files.wordpress.com/2012/10/sensor-nivel-2.jpg>

Especificaciones:

Tabla 16. Especificación del sensor del nivel

nombre del producto	sensor de nivel de agua
máximo contacto con calificación	10w
máximo voltaje con selector de	100V dc
Corriente de conmutación máx	0,5
máxima tensión de ruptura	220 VCC
max llevar la corriente	1.0a
máxima resistencia de contacto	100m ω
rango de temperaturas	-10 ~ 60 ° C / +85 ° C
material de la bola flotante	pp
Material del cuerpo flotante	pp
tamaño de la bola flotante (aprox.)	10 x 24 mm / 0.39 "x 0.94" (d * h)
hilo de diámetro (aprox.)	11,5 mm / 0.453 "
tamaño de la tuerca hexagonal (aprox)	19 mm / 0.748 "
parte inferior de diámetro clip (aprox.)	20,5 mm / 0,8 "

Fuente: <http://www.sourcingmap.es/acuario-agua-sensor-nivel-blanco-angulo-recto-interruptor-flotador-p-136549.html>

3.16.3 Contactor. Un contactor es un componente electromecánico que tiene por objetivo establecer o interrumpir el paso de corriente, ya sea en el circuito de potencia o en el circuito de mando, tan pronto se dé tensión a la bobina (en el caso de ser contactores instantáneos). Un contactor es un dispositivo con capacidad de cortar la corriente eléctrica de un receptor o instalación, con la posibilidad de ser accionado a

distancia, que tiene dos posiciones de funcionamiento: una estable o de reposo, cuando no recibe acción alguna por parte del circuito de mando, y otra inestable, cuando actúa dicha acción. Este tipo de funcionamiento se llama de "todo o nada". En los esquemas eléctricos, su simbología se establece con las letras KM seguidas de un número de orden.

Figura 42. Contactor LS Metasol MC-9b



General Specifications

Maximum Voltage	600V AC
Rated Frequency	50/60Hz
Operating Temperature	-5°C (23°F) to +40°C (104°F)
Degree of protection	IP20
Resistance to Vibration (5-300Hz)	> 15g
Flame Resistance	According to UL94

Fuente: http://www.altechcorp.com/PDFS/Contactors_MC.pdf

3.16.4 Temporizador. Un relé temporizador es un componente que está diseñado para temporizar eventos en un sistema de automatización industrial, cerrando o abriendo contactos antes, durante o después del período de tiempo ajustado. Estos aparatos son compactos y constan de:

- Un oscilador que proporciona impulsos.
- Un contador programable en forma de circuito integrado.
- Una salida estática o de relé.

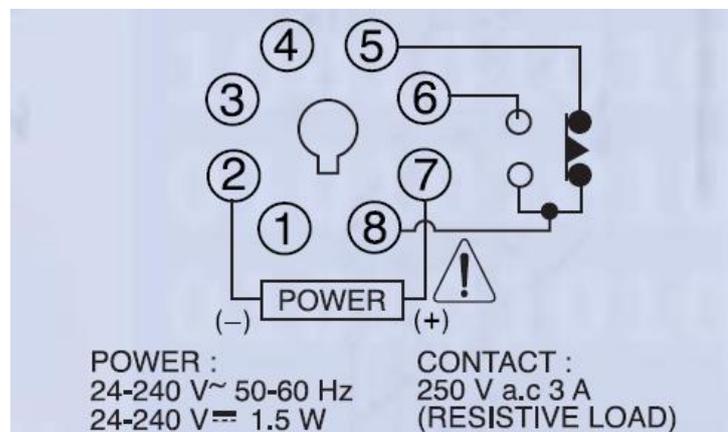
Figura 43. Tipos de temporizadores HANYOUNG NUX



Fuente: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=883>

Es posible ajustar el contador mediante un potenciómetro graduado en unidades de tiempo, situado en la parte frontal del aparato. De este modo, el equipo cuenta los impulsos que siguen al cierre (o la apertura) de un contacto de control y al alcanzar el número de impulsos, es decir, una vez transcurrida la temporización, genera una señal de control hacia la salida.

Figura 44. Circuito de conexión del temporizador



Fuente: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=883>

Aparatos de Salida Estática

Existen dos versiones disponibles (Trabajo y Reposo), con distintas gamas de temporización. Estos relés se conectan directamente en serie con la carga cuya puesta en tensión o retirada se retrasa.

Existen las siguientes versiones:

- De Trabajo, de Reposo o de Trabajo y Reposo.
- Con contacto de paso.

Intermitente (simétrico o asimétrico), de arranque en fase de trabajo o de reposo.

- Para arrancadores estrella-triángulo.
- Multifunción, que reúne las prestaciones de los relés anteriores.

Todos estos relés permiten seleccionar varios rangos de temporización mediante un conmutador.

- Ciertos modelos disponen de los siguientes controles y reglajes remotos.
- Puesta en marcha del temporizador por contacto exterior.
- Suspensión momentánea de la temporización por contacto exterior.
- Ajuste de la temporización por potenciómetro exterior

3.16.5 *Arduino*

Figura 45. Arduino Uno



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

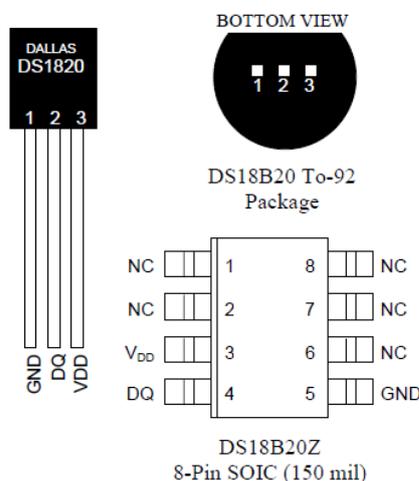
Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software tal como Adobe Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data. Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Arduino puede tomar información del entorno a través de sus entradas analógicas y digitales, puede controlar luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing).

3.16.6 Sensor de temperatura (Termómetro digital DS1820). Es un dispositivo en encapsulado “tipo transistor” PR35 o “tipo integrado” SSOP (en lugar del tradicional botón) y permite medir temperaturas desde -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ en incrementos de 0.5°C con 9 bits de precisión en un tiempo típico de 200 ms.

El sistema opera sobre la ya tradicional interfaz de un conductor (1 wire bus), no siendo imprescindible alimentación externa y teniendo un número de serie en ROM de 64 bits, lo que permite tener un conjunto de termómetros conectados por medio del bus de un conductor y ser interrogados de a uno por su número de serie, como si se trataran de botones.

Figura 46. Presentación de los sensores



Fuente: <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/temperatura/termometro.pdf>

El DS1820, tiene, además del número de serie y de la interfaz de un conductor, un circuito medidor de temperatura y dos registros que pueden emplearse como alarmas de máxima y de mínima temperatura.

Este termómetro se basa en un par de osciladores de frecuencia proporcional a la temperatura. El oscilador de frecuencia proporcional a la alta temperatura actúa como habilitación (gate) del conteo del oscilador de frecuencia proporcional a la baja temperatura. Existe un circuito (Slope Accumulator) encargado de compensar las alinealidades de la variación de frecuencia de los osciladores con la temperatura.

Las alarmas de máxima y mínima son dos valores almacenados en una memoria EEPROM y que en caso de programarse para ser tenidas en cuenta, afectarán un indicador (flag) de exceso que podrá ser leído y tenido en cuenta por la computadora controladora de todo el sistema.

Estas alarmas son comparadas con el valor de temperatura medido inmediatamente de terminada la medición, es decir que el flag de alarma será actualizado después de cada medición.

Figura 47 Descripción de los puertos del sensor

PIN 8PIN SOIC	PIN TO92	SYMBOL	DESCRIPTION
5	1	GND	Ground.
4	2	DQ	Data Input/Output pin. For 1-Wire operation: Open drain. (See "Parasite Power" section.)
3	3	V _{DD}	Optional V_{DD} pin. See "Parasite Power" section for details of connection. V _{DD} must be grounded for operation in parasite power mode.

Fuente: <http://blog.bricogeek.com/noticias/electronica/como-funciona-un-sensor-de-temperatura-one-wire-ds18b20/>

3.16.7 Relé. El relé o relevador es un dispositivo electromecánico. Funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se acciona un juego de uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Fue inventado por Joseph Henry en 1835.

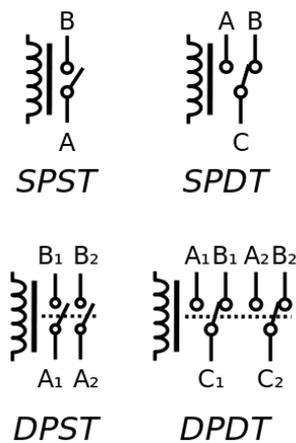
Dado que el relé es capaz de controlar un circuito de salida de mayor potencia que el de entrada, puede considerarse, en un amplio sentido, como un amplificador eléctrico. Como tal se emplearon en telegrafía, haciendo la función de repetidores que generaban

una nueva señal con corriente procedente de pilas locales a partir de la señal débil recibida por la línea. Se les llamaba "relevadores". De ahí "relé".

Descripción. En la Figura 48 se representa, de forma esquemática, la disposición de los distintos elementos que forman un relé de un único contacto de trabajo o circuito. En la Figura 3 se puede ver su funcionamiento y cómo conmuta al activarse y desactivarse su bobina.

Estructura y funcionamiento. El electroimán hace bascular la armadura al ser excitada, cerrando los contactos dependiendo de si es N.A o N.C (normalmente abierto o normalmente cerrado). Si se le aplica un voltaje a la bobina se genera un campo magnético, que provoca que los contactos hagan una conexión. Estos contactos pueden ser considerados como el interruptor, que permite que la corriente fluya entre los dos puntos que cerraron el circuito.

Figura 48. Esquema de los diferentes tipos de relés



Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%A9>

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

4.1 Generalidades

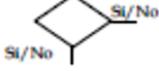
Al finalizar la etapa de diseño y selección de equipos, éste capítulo inicia describiendo detalladamente el proceso de construcción de las partes integrantes del conjunto y consecutivamente se indica los pasos para el acoplamiento e instalación de equipos y accesorios.

Incluye además la descripción del tablero de control eléctrico y los pasos para la puesta en marcha del equipo.

Para cada actividad de transporte, almacenamiento, operación y pruebas del equipo instalado, se tomará en cuenta el cumplimiento de la normativa ASME vigente, de manera que, los procesos estén dentro de los parámetros técnicos, garantizando eficiencia y resultados óptimos.

Tabla 17. Código ASME

Símbolo	Significado	Para que se utiliza
	Origen	Este símbolo sirve para identificar el paso previo que da origen al proceso, este paso no forma en sí parte del nuevo proceso.
	Operación	Hay una operación cada vez que un documento es cambiado intencionalmente en cualquiera de sus características.
	Inspección	Indica cada vez que un documento o paso del proceso se verifica, en términos de: la calidad, cantidad o características. Es un paso de control dentro del proceso. Se coloca cada vez que un documento es examinado.
	Transporte	Indica cada vez que un documento o equipo se mueve o traslada a otra oficina y/o funcionario.
	Demora	Indica cuando un documento o el proceso se encuentra detenido, ya que se requiere la ejecución de otra operación o el tiempo de respuesta es lento.

	Almacenamiento	Indica el depósito permanente de un documento o equipo. También se puede utilizar para guardar o proteger, de un traslado no autorizado.
	Almacenamiento Temporal	Indica el depósito temporal de un documento o equipo, mientras se da inicio el siguiente pasó.
	Decisión	Indica un punto dentro del flujo en que son posibles varios caminos alternativos.
	Líneas de flujo	Conecta los símbolos señalando el orden en que se deben realizar las distintas operaciones.
	Actividades Combinadas Operación y Origen	Las actividades combinadas se dan cuando se simplifican dos actividades en un solo paso. En este caso, esta actividad indica que se inicia el proceso a través de actividad que implica una operación.
	Actividades Combinadas Inspección y Operación	Este caso, indica que el fin principal es efectuar una operación, durante la cual puede efectuarse alguna inspección.

Fuente: <http://www.asme.org/>

4.2 Diagrama de proceso general

Enseguida se muestra la secuencia general del proceso de construcción e instalación:

-  Elaboración de planos para la construcción.
-  Adquisición e inspección de materiales.
-  Construcción del tanque.
-  Revisión de acabados del tanque.
-  Construcción de la estructura.
Revisión de acabados de la estructura.
-  Almacenamiento previo del tanque y la estructura.
-  Construcción de los moldes

- Revisión de acabados de los moldes.
- Inspección del lugar de instalación.
- Acoplamiento de los equipos a la estructura.
- Diseño y armado del tablero de control eléctrico.
- Transporte del equipo al sitio de instalación.
- Instalación de la tubería de recirculación.
- Control de fugas.
- Instalación del tablero de control.
- Puesta en marcha y control de funcionamiento.

4.3 Actividades previas a la fase de construcción

4.3.1 *Elaboración de planos para construcción.* Después de realizar el diseño, se selecciona los materiales, accesorios e instrumentos, se elaboran los planos de construcción, que no es más que, los primeros bosquejos en los cuales se detallan todas las dimensiones necesarias para la construcción de cada una de las partes del equipo, así como su posición en el ensamble general.

Los planos están adjuntos al final de este documento.

4.3.2 *Requerimiento de materiales y equipos.* Con la ayuda de los planos es posible estimar la cantidad de material e insumos a utilizar en la construcción de las partes del equipo.

4.3.3 *Recepción del material.* El material adquirido es inspeccionado para descartar fallas, y es almacenado en la bodega del lugar escogido para la construcción.

Descripción de los procesos y métodos por elemento de máquina fabricado.

4.4 Construcción del tanque de almacenamiento.

El tanque de almacenamiento fue fabricado en su totalidad con lámina de acero inoxidable 316, de 1,5 mm asegurándole una vida útil apropiada debido a estar expuesto al contacto con sustancias altamente corrosivas, elaborado mediante operaciones de corte, doblada y soldada. Sus medidas generales y despiece se indican en el plano

Figura 49. Tanque de almacenamiento



Fuente: Autores

Procedimiento:

- Cortar piezas de lámina de acero inoxidable considerando las dimensiones y forma que indica el plano
- Verificar que las medidas de las piezas estén dentro de un rango de aceptabilidad.
- Unir las piezas del cuerpo interior mediante soldadura de arco eléctrico.
- ◻ Inspeccionar que los puntos de soldadura unan correctamente las piezas.
- Pulir uniones soldadas.

- Acoplar el cuerpo interior, con las piezas del cuerpo exterior.
- Pulir uniones soldadas.
- Unir el conjunto mediante soldadura de arco eléctrico.
- Perforar orificios en la parte inferior para la inyección del aislante.
- Inyectar la espuma de poliuretano en cada pared.
- Limpieza del conjunto.

Indicadores:

Equipo y herramientas utilizadas: Flexómetro, rayador, cizalla, soldadora de arco eléctrico, amoladora, taladro.

Material utilizado: Lámina 2440x1220x01, 5 mm de acero inoxidable 316, 15 electrodos para acero inoxidable E-309, espuma de poliuretano.

Consumos adicionales: Disco para pulir y Lija #230, broca de 1/2 in para acero inoxidable.

4.5 Construcción de la estructura.

La estructura soporte fue fabricada en su totalidad con Tubo cuadrado de 1 in y 1,5 mm de espesor, mediante operaciones de corte, y soldado. Sus medidas generales se indican en el plano.

Procedimiento:

- Cortar el tubo cuadrado según medidas que indica el plano.
- Verificar la precisión de los cortes.
- Soldar los marcos principales.
- Comprobar alineamiento y ángulos a escuadra de cada uno de los elementos que conforman los marcos principales de la estructura.

- Soldar los marcos secundarios.
- Pulir superficies y lijar.
- Pintar.
- ◐ Dejar secar.
- ◻ Control de acabados.
- Limpieza del conjunto.

Indicadores:

Equipo y herramientas utilizadas: Flexómetro, rayador, Cortadora eléctrica de disco, soldadora de arco eléctrico, amoladora, compresor, soplete.

Material utilizado: Tubo cuadrado de 1 in y 1,5 mm de espesor, pintura sintética y diluyente.

4.6 Construcción de los moldes.

Los moldes fueron construidos en su totalidad de láminas de acero inoxidable 316 de 2 mm de espesor, a fin de asegurar una vida útil lo suficiente larga debido a su exposición a la salmuera, altamente corrosiva, elaborado mediante operaciones de corte, doblado y soldado. Sus medidas generales se indican en el plano.

Figura 50. Moldes



Fuente: Autores

Procedimiento:

- Cortar las láminas según medidas que indica el plano.
- Verificar la precisión de los cortes.
- Doblar las caras del molde.
- Soldar los extremos para cerrar las caras del molde.
- Cortar piezas de lámina de acero inoxidable para los soportes
- Unir las piezas mediante soldadura de arco eléctrico.
- Unir los soportes al tanque
- Control de acabados.
- Limpieza del conjunto.

Figura 51. Montaje de los soportes de los moldes en el tanque



Fuente: Autores

Indicadores:

Equipo y herramientas utilizadas: Flexómetro, rayador, cortadora eléctrica de disco, soldadora de arco eléctrico, amoladora.

Material utilizado: Lámina 2440x1220x02 mm de acero inoxidable 316,

Consumos adicionales: Electrodo E-6011, disco de corte, esmeril, lijas.

4.7 Ensamble del equipo

Ensamble tanque – estructura. El tanque se encuentra acoplado a la estructura por presión, por apriete.

Figura 52. Ensamble tanque estructura



Fuente: Autores

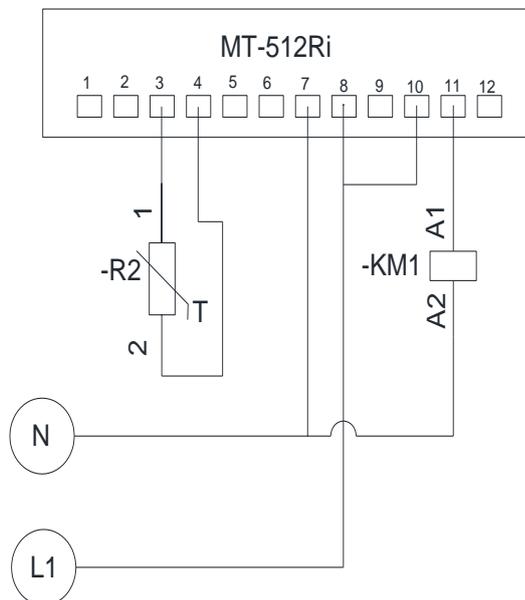
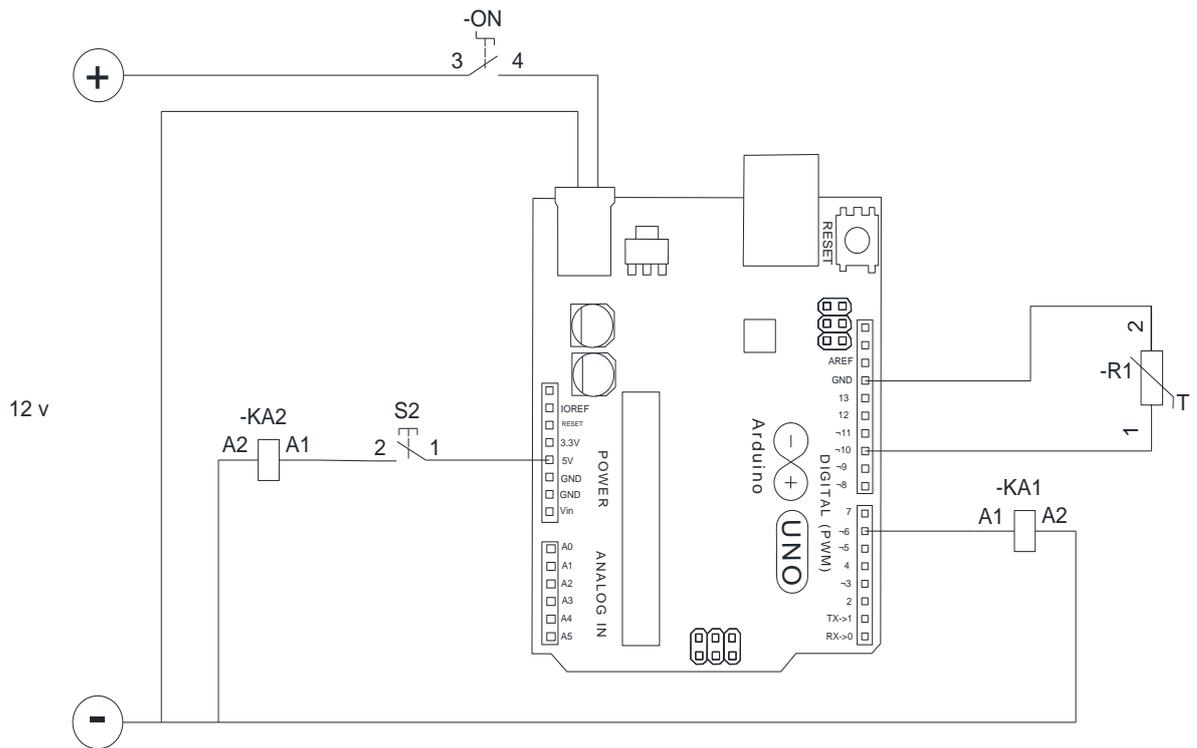
4.8 Diseño y ensamble del tablero de control

Este tablero de control es de 200x300x150mm contiene en su interior los elementos y conexiones necesarias para el control del equipo, ha sido diseñado específicamente para albergar de manera segura dispositivos eléctricos y electrónicos.

Se encuentra ubicado en la parte frontal de la estructura en el lado izquierdo, a una altura apropiada para facilitar las operaciones del equipo por parte del estudiante.

4.8.1 *Diagrama del circuito de control.* En la siguiente figura se presenta el diagrama del circuito de control basado en la norma IEC 1082-1 de estandarización de esquemas:

Figura 53. Diagrama del circuito de control



Fuente: Autores

4.8.2 Programación de arduino. A continuación se encuentra los códigos de programación que se encuentra en el microcontrolador de arduino para su funcionamiento automático.

control final de carrera.ino en este archivo esta la programación del sensor de final de formación del bloque.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
DeviceAddress Temperatura1;
// Temperatura
int DS18S20_Pin = 10;           //Pin de entrada donde conectamos el sensor
OneWire ds(DS18S20_Pin);
DallasTemperature sensors(&ds);
float TemperaturaA;
int FINAL=6;
int STOP=3;
int ON=5;
void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);           // Buscamos el sensor,
  sensors.begin();

  pinMode(FINAL,OUTPUT);       // declaramos los puertos como salidas
  pinMode(STOP,OUTPUT);
  pinMode(ON,OUTPUT);

  digitalWrite(FINAL,LOW);
  digitalWrite(STOP,HIGH);
  digitalWrite(ON,HIGH);
}
void loop(void)
{
  digitalWrite(ON,LOW);
  {
    sensors.requestTemperatures();
    TemperaturaA = sensors.getTempCByIndex(0);
    Serial.print (TemperaturaA);
    Serial.println (" C");
    delay (1000);
  }
}
```

```

if (TemperaturaA<-6)
{
    digitalWrite(FINAL,LOW);

    digitalWrite(STOP,LOW);
    delay(200);
    digitalWrite(STOP,HIGH);
    delay(43200000);
}
else
{
    digitalWrite(FINAL,HIGH);
}
}

```

datos enfriamiento agua.ino, en este archivo se encuentra la programación de para la obtención de datos de enfriamiento del agua.

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS 13

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensores(&oneWire);
//Indicamos las direcciones de los sensores
DeviceAddress S3 = {0x28, 0xA0, 0x87, 0xB6, 0x01, 0x00, 0x00, 0xEB}; // (y)
DeviceAddress S2 = {0x28, 0x24, 0xBB, 0xA8, 0x03, 0x00, 0x00, 0x1A}; // (y)
DeviceAddress S1 = {0x28, 0x4D, 0x6C, 0x41, 0x03, 0x00, 0x00, 0x9A}; // (y)
DeviceAddress S4 = {0x28, 0xC7, 0x84, 0x7F, 0x04, 0x00, 0x00, 0x7C}; // (y)
DeviceAddress S5 = {0x28, 0x0E, 0x52, 0x41, 0x03, 0x00, 0x00, 0x90}; // (x)
DeviceAddress S6 = {0x28, 0x48, 0xB2, 0xA8, 0x03, 0x00, 0x00, 0x57}; // (x)
DeviceAddress S7 = {0x28, 0x8E, 0xD2, 0xA8, 0x03, 0x00, 0x00, 0x6B}; // (x)
DeviceAddress S8 = {0x28, 0x24, 0x7C, 0x41, 0x03, 0x00, 0x00, 0xB3}; // (x)
DeviceAddress S9 = {0x28, 0xCC, 0xED, 0xD8, 0x04, 0x00, 0x00, 0x49}; // (z)
DeviceAddress S10= {0x28, 0xC3, 0x33, 0x70, 0x02, 0x00, 0x00, 0xF5}; // (z)

```

```
DeviceAddress S11= {0x28, 0x92, 0xA8, 0x01, 0x03, 0x00, 0x00, 0xA7}; // (z)
DeviceAddress S12 = {0x28, 0x40, 0xDF, 0xD7, 0x04, 0x00, 0x00, 0x43}; // (z)
```

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Abrimos la comunicación por serial
  sensores.begin(); //Iniciamos los sensores
}
void loop() /***** LOOP: RUNS CONSTANTLY *****/
{
  sensores.requestTemperatures();
  Serial.print("                sensor 1: ");
  printTemperature(S1);
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();

  Serial.print("                sensor 2: ");
  printTemperature(S2);
  Serial.println();
  Serial.println();

  Serial.print("                sensor 5: ");
  printTemperature(S5);
  Serial.println();
  Serial.println();

  Serial.print("sensor 9: ");
  printTemperature(S9);
  Serial.println();
  Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 6: ");  
printTemperature(S6);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 10: ");  
printTemperature(S10);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 3: ");  
printTemperature(S3);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 11: ");  
printTemperature(S11);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 7: ");  
printTemperature(S7);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 12: ");  
printTemperature(S12);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("sensor 8: ");  
printTemperature(S8);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 4: ");  
printTemperature(S4);
```

```

Serial.println();
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println();

delay(30000);
}/*--(end main loop )---

void printTemperature(DeviceAddress deviceAddress)
{
float tempC = sensores.getTempC(deviceAddress);
  if (tempC == -127.00)
  {
    Serial.print("Error getting temperature");
  }
  else
  {

    Serial.print(tempC);
    Serial.print(" C");
  }
}
} // End printTemperature
*****

datos formación hielo.ino, en este archive se encuentra la programacion para la
adquisicion de datos de temperatura en la formacion de hielo.
*****

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS 13

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensores(&oneWire);

//Indicamos las direcciones de los sensores
DeviceAddress S3 = {0x28, 0xA0, 0x87, 0xB6, 0x01, 0x00, 0x00, 0xEB}; // (y)

```

```

DeviceAddress S2 = {0x28, 0x24, 0xBB, 0xA8, 0x03, 0x00, 0x00, 0x1A}; // (y)
DeviceAddress S1 = {0x28, 0x4D, 0x6C, 0x41, 0x03, 0x00, 0x00, 0x9A}; // (y)
DeviceAddress S4 = {0x28, 0xC7, 0x84, 0x7F, 0x04, 0x00, 0x00, 0x7C}; // (y)
DeviceAddress S5 = {0x28, 0x0E, 0x52, 0x41, 0x03, 0x00, 0x00, 0x90}; // (x)
DeviceAddress S6 = {0x28, 0x48, 0xB2, 0xA8, 0x03, 0x00, 0x00, 0x57}; // (x)
DeviceAddress S7 = {0x28, 0x8E, 0xD2, 0xA8, 0x03, 0x00, 0x00, 0x6B}; // (x)
DeviceAddress S8 = {0x28, 0x24, 0x7C, 0x41, 0x03, 0x00, 0x00, 0xB3}; // (x)
DeviceAddress S9 = {0x28, 0xCC, 0xED, 0xD8, 0x04, 0x00, 0x00, 0x49}; // (z)
DeviceAddress S10= {0x28, 0xC3, 0x33, 0x70, 0x02, 0x00, 0x00, 0xF5}; // (z)
DeviceAddress S11= {0x28, 0x92, 0xA8, 0x01, 0x03, 0x00, 0x00, 0xA7}; // (z)
DeviceAddress S12 = {0x28, 0x40, 0xDF, 0xD7, 0x04, 0x00, 0x00, 0x43}; // (z)

```

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Abrimos la comunicación por serial
  sensores.begin(); //Iniciamos los sensores
}

void loop() /***** LOOP: RUNS CONSTANTLY *****/
{
  sensores.requestTemperatures();
  Serial.print("                sensor 1: ");
  printTemperature(S1);
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();
  Serial.println();

  Serial.print("                sensor 2: ");
  printTemperature(S2);
  Serial.println();
  Serial.println();

  Serial.print("                sensor 5: ");

```

```
printTemperature(S5);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("sensor 9: ");  
printTemperature(S9);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 6: ");  
printTemperature(S6);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 10: ");  
printTemperature(S10);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 3: ");  
printTemperature(S3);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 11: ");  
printTemperature(S11);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 7: ");  
printTemperature(S7);  
Serial.println();  
Serial.println();
```

```
Serial.print("                sensor 12: ");  
printTemperature(S12);  
Serial.println();
```

```

Serial.println();

Serial.print("sensor 8: ");
printTemperature(S8);
Serial.println();
Serial.println();

Serial.print("                sensor 4: ");
printTemperature(S4);
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println();
Serial.println();

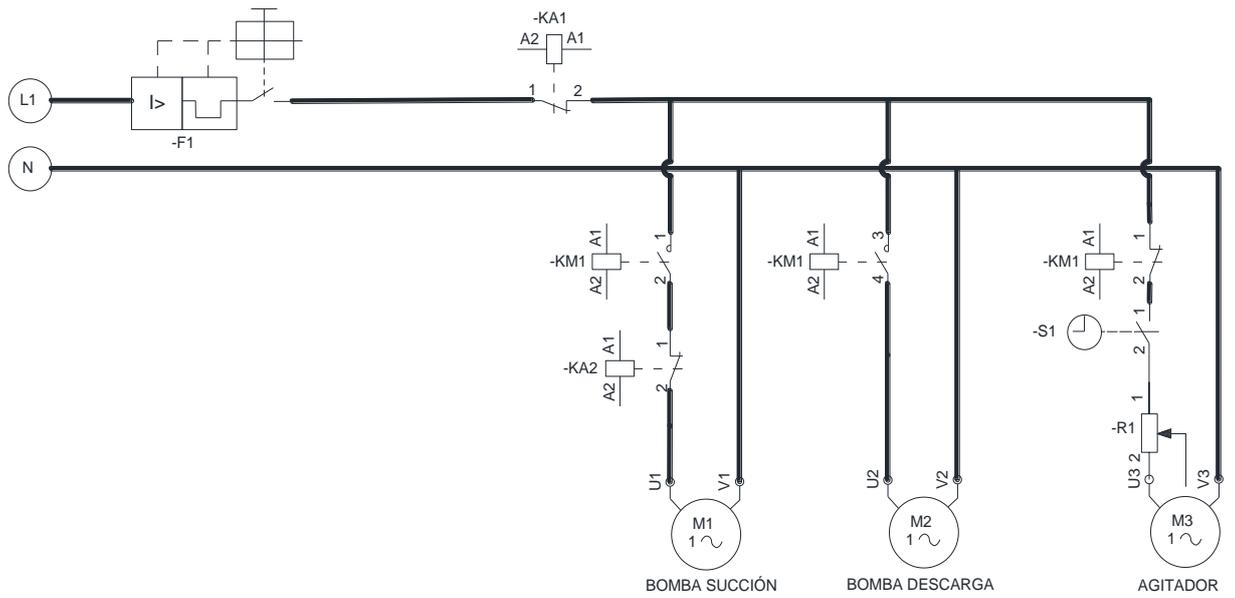
delay(600000);
}/*--(end main loop )---

void printTemperature(DeviceAddress deviceAddress)
{
float tempC = sensores.getTempC(deviceAddress);
  if (tempC == -127.00)
  {
    Serial.print("Error getting temperature");
  }
  else
  {
    Serial.print(tempC);
    Serial.print(" C");
  }
}
}/* End printTemperature
*****

```

4.8.3 Diagrama de circuito de potencia. En la siguiente figura se presenta el diagrama del circuito de potencia basado en la norma IEC 1082-1 de estandarización de esquemas:

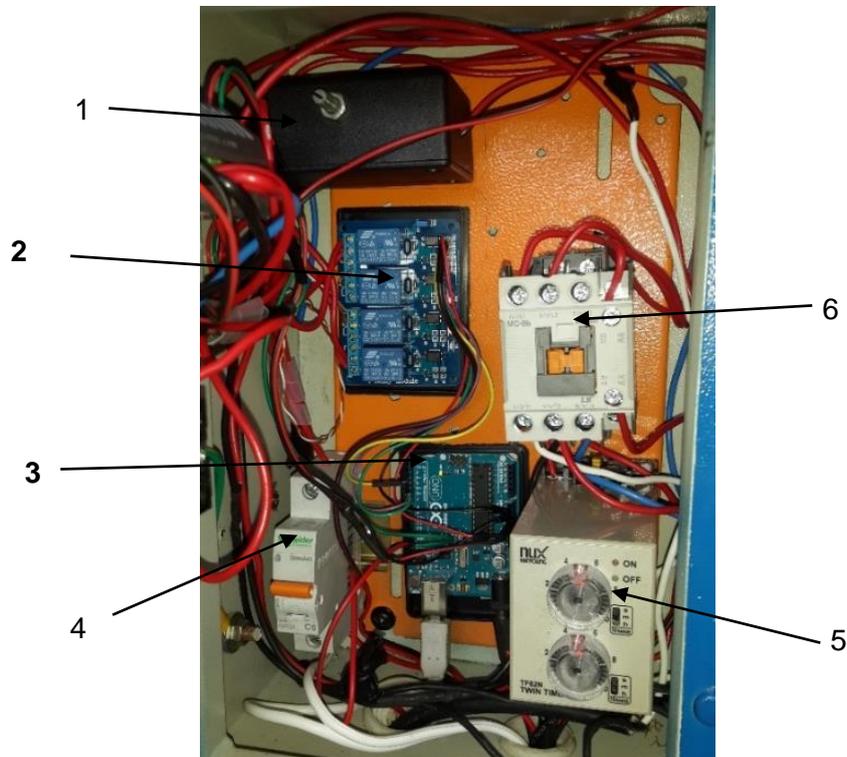
Figura 54. Diagrama de circuito de potencia



Fuente: Autores

4.8.4 Descripción interna del tablero de control. Los elementos eléctricos utilizados en el interior del tablero de control se describen a continuación:

Figura 55. Elementos internos del tablero de control



Fuente: Autores

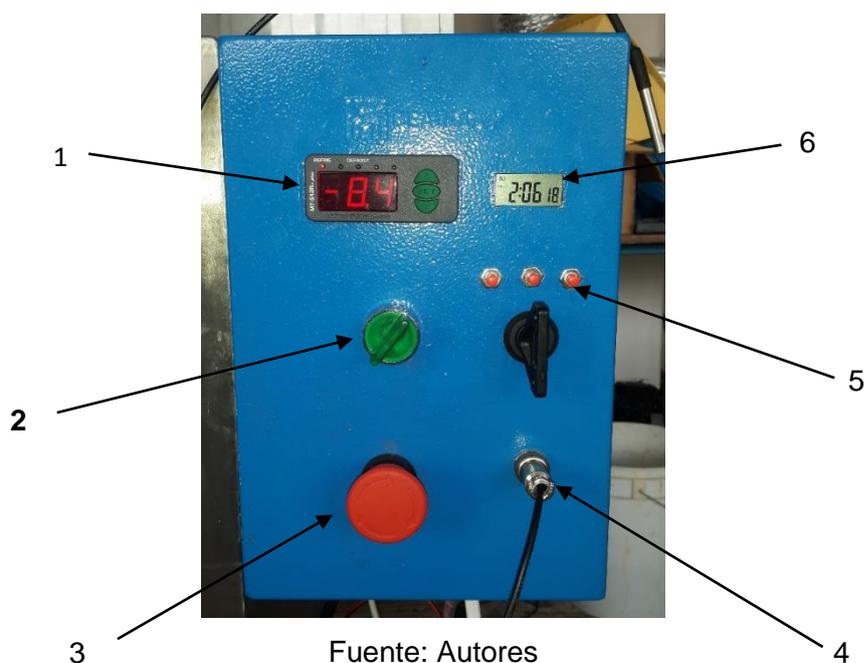
Tabla 18 Descripción de los elementos externos del tablero de control

Referencia	Descripción
1	regulador de velocidad del agitador
2	modulo de relés
3	placa arduino uno
4	interruptor termo magnético
5	temporizador
6	contactor

Fuente: Autores

4.8.5 *Descripción externa del tablero de control.* Los elementos eléctricos utilizados en el exterior tablero de control se describen a continuación:

Figura 56. Elementos externos del tablero de control



Fuente: Autores

Tabla 19. Descripción de los elementos externos del tablero de control

Referencia	Descripción
1	controlador de temperatura del tanque
2	interruptor ON/OFF
3	Botón de emergencia
4	acople rápido sensor final de formación de hielo
5	pulsadores: modo - start/stop - reset
6	cronometro

Fuente: Autores

CAPÍTULO V

5 ANÁLISIS DE COSTOS

5.1 Introducción

Se conoce al análisis de costos como un proceso de identificación de los recursos necesarios para llevar a cabo un proyecto, determinando la cantidad de recursos necesarios y los gastos previstos.

En la resolución de este proyecto se evaluarán los gastos realizados desde el diseño hasta la culminación de la construcción y montaje del generador de hielo, y la fase de pruebas.

A continuación se presentan tablas en las que se especifican los costos directos e indirectos del proyecto.

5.2 Costos directos

Los costos que intervienen directamente en el proyecto son los dados por materiales, transporte y mano de obra del proyecto.

Tabla 20. Costo de materiales estructurales para tanque y estructura

Ítem	Descripción	Unidad	Cant.	V. Unitario	V. Total
1	Tubo cuadrado 1 in 1,5mm	6m	1	10,22	10,22
2	Perfil L de 1in x 1/8"	6m	1	11,79	11,79
3	Plancha acero inox. 1,5 mm	unidad	1	110	110
4	Plancha acero inox. 2 mm	unidad	1	150	150
5	Ruedas	unidad	4	3,5	14
6	poliuretano expandido	unidad	1	120	120
7	Mano de obra y equipos		1	200	200
8	tornillos autoroscables 5/32"	Unidad	20	0,05	1
9	pernos de 1/4"	Unidad	16	0,25	4
				Total(+IVA)	617,01

Fuente: Autores

Tabla 21. Costo de mariales eléctricos y de control automático

Ítem	Descripción	Unidad	Cant.	V. Unitario	V. Total
1	Arduino uno	unidad	1	45	45
2	Controlador digital de temperatura MT-512Ri plus	unidad	1	60	60
3	Timer TF62N	unidad	1	55	55
4	Base para timer	unidad	1	5	5
5	Braker schneider 110/230V 5 KVA	unidad	1	6	6
6	contactor LS Metasol 110 V	unidad	1	12	12
7	modulo de relés auxiliares	unidad	1	18	18
8	batería 12V recargable	unidad	1	25	25
9	regulador de voltaje 12V a 9V	unidad	1	5	5
10	Gabinete metálico 25x30x15	unidad	1	20	20
11	Gabinete metálico 15x15x10	unidad	1	8,5	8,5
12	variador de frecuencia	unidad	1	10	10
13	Pulsador CC	unidad	3	0,5	1,5
14	Pulsador de emergencia con auto enclavamiento	unidad	1	4	4
15	interruptor de perilla 2 posiciones	unidad	1	6	6
16	cronometro digital	unidad	1	5,8	5,8
17	acople hembra macho 4 hilos	unidad	1	2	2
18	Sensor ds18b20 aislado	unidad	1	15	15
19	Sensor ds18b20	unidad	20	6	120
20	Conductor CU flexible #18 rojo Cable	m	5	0,25	1,25
21	Conductor CU flexible #18 negro Cable	m	5	0,25	1,25
22	Conductor CU 2x14 AWG 300V	m	5	0,8	4
23	Enchufe polarizado 110V plástico Cooper	unidad	1	2	2
24	Cinta espiral 6mm 1/2 Camsco	m	3	0,35	1,05
25	sensor de nivel	unidad	1	8,5	8,5
26	caja plástica 6x9x3,5 cm	unidad	2	3,25	6,5
27	protector termo-retráctil	m	5	1	5
28	cinta double fase	m	2	1	2
				Total(+IVA)	455,35

Fuente: Autores

Tabla 22. Costo de equipos y materiales del sistema de recirculación

Ítem	Descripción	Unidad	Cant.	V. Unitario	V. Total
1	Bomba chugger ssc 0,04Hp 115 V	unidad	2	200	400
2	desaduanización bombas	unidad	2	60	120
3	motor sewingmachinemotor 110 V; 1.2 A, 7000RPM	unidad	1	12	12
4	hélice para agitador	unidad	1	30	30
5	tornillo prisionero	unidad	1	0,5	0,5
6	tubo de 1/2" PVC	6m	1	10	10
7	tubo de 3/4" PVC	6m	1	13	13
8	válvula check	unidad	2	2,25	4,5
9	válvula de paso	unidad	2	9,5	19
10	unión universal 3/4"	unidad	2	1,5	3
11	unión universal 1/2"	unidad	2	1	2
12	codos radio corto 1/2"	unidad	9	0,5	4,5
13	codos radio corto 3/4"	unidad	2	0,7	1,4
13	acople hembra 1/2"	unidad	1	0,6	0,6
14	pernos de 1/4"	unidad	8	0,25	2
14	rubatex	m	4	2	8
total					630,5

Fuente: Autores

Tabla 23. Costos de materiales adicionales

Ítem	Descripción	Unidad	Cant.	V. Unitario	V. Total
1	teflón	unidad	1	3	3
2	silicón	Unidad	1	4,5	4,5
3	spray Paint 400ml	unidad	4	5,25	21
4	Taype	unidad	1	1,5	1,5
5	estaño	m	3	0,75	2,25
6	desoxidante para hierro	unidad	1	3,2	3,2
7	extras por construcción	unidad	1	20	20
Total(+IVA)					55,45

Fuente: Autores

El valor total de los costos por materiales se calcula en la tabla 24.

Tabla 24. Costo de mariales

Denominación	V. Total(+IVA)
Costos de mariales estructurales para tanque y estructura	617,01
Costos de mariales eléctricos y de control automático	455,35
costos de equipos y materiales del sistema de recirculación	630,5
Costos de mariales extras	55,45
Total costo de materiales	1758,31

Fuente: Autores

Tabla 25.Costo de envío y transporte

Denominación	Descripción	V. total
Envío Controlador digital de temperatura MT-512Ri	MEGAFRIO Ambato - Riobamba	3,00
Transporte material estructural	Comercial Vera - Taller	4,00
Transporte equipo	Taller - ESPOCH	3,00
Total costo de envío y transporte		10,00

Fuente: Autores

Tabla 26.Costo de mano de obra

Denominación	Descripción	V.total
Técnico eléctrico	Conexiones eléctricas	50,00
Mecánico	Construcción del tanque, estructura y moldes	200,00
Total costo de mano de obra		250,00

Fuente: Autores

El total de los costos directos se presentan a continuación:

Tabla 27. Costos directos

Denominación	V. Total
Costos de materiales	1758,31
Costos de envío y transporte	10,00
Costo de mano de obra	250,00
Total costos directos	2118,31

Fuente: Autores

5.3 Costos indirectos

Se consideran como costos indirectos los dados por: ingeniería del proyecto (del 10 al 15% del costo directo del proyecto), herramientas utilizadas (se estima el 5% del costo total de las herramientas utilizadas), imprevistos y utilidades.

Tabla 28. Costos indirectos

Denominación	V. Total
Costos por ingeniería	200,00
Costos por herramientas utilizadas	20,00
Costo por imprevistos	50,00
Utilidades	0
Total costos Indirectos	270,00

Fuente: Autores

Finalmente el costo total por el diseño y construcción del equipo se observa en la tabla 29.

Tabla 29. Costo total del equipo

Denominación	V. Total
Costos directos	2118,31
Costos indirectos	270,00
Costo total del equipo	2388,31

Fuente: Autores

El costo total del Equipo es de \$ 2388,31 (dos mil trescientos ochenta y ocho dólares americanos con 31/100).

CAPÍTULO VI

6 FASE EXPERIMENTAL

En este capítulo se verificará la funcionalidad y eficiencia que tiene el equipo, por lo que se presentará el desarrollo y análisis de los parámetros establecidos en función del tiempo.

6.1 Etapas de análisis

Para la generación de hielo en bloques es necesario establecer las condiciones iniciales y analizar cada etapa del proceso que a continuación se menciona.

6.1.1 Puesta en marcha del proceso. Antes de poner en marcha el equipo de generación de hielo en bloques, se debe haber puesto en marcha el equipo contiguo, el cual es el que provee de salmuera a la temperatura deseada en el generador.

Para encender el equipo y seguir el procedimiento de puesta en marcha, se verifica que el interruptor termo magnético este cerrado, seguido de eso se gira el interruptor de perilla (perilla verde). Enseguida se encenderá el agitador a la par que el controlador de temperatura censa la temperatura en el tanque, a los pocos segundos se encenderán las bombas, que harán circular la salmuera hasta reemplazarla por completo por una a baja temperatura.

Figura 57. Puesta en marcha del equipo



Fuente: Autores

6.1.2 *Etapa de enfriamiento la salmuera.* Una vez encendido el equipo, y la salmuera empieza a bajar su temperatura, se preparan los moldes con la cantidad de agua especificada. Antes de introducir los moldes en la salmuera debemos esperar a que esta haya llegado a la temperatura seteada en el controlador, es decir las bombas se hayan apagado; antes de introducir los moldes se debe cargar la programación en el segundo arduino (COM 4), cumplido esto se introducen los moldes, se activa el cronometro presionando el botón “MODO”, seguido del botón “START”.

Figura 58 Activación del cronometro



Fuente: Autores

6.1.3 *Etapa de enfriamiento del agua.* Antes de iniciar el proceso se debe cargar la programación `datos_enfriamiento_del_agua.ino` en el arduino (COM4). Una vez introducidos los moldes, se insertan la matriz de sensores, se conecta el cable de datos y se presiona el botón  iniciar la visualización y adquisición de los datos de temperatura, el agua empezara a disminuir su temperatura, iniciando por sus extremos, por así decirlo, que se encuentran en contacto con los moldes y a su vez con la salmuera. A pesar de no existir agitación en el agua esta se ira enfriando proporcionalmente debido al efecto termosifón.

6.1.4 *Etapa de generación de hielo.* Antes de iniciar el proceso se debe cargar la programación `datos_formacion_de_hielo.ino` en el arduino (COM4). Una vez introducidos los moldes, se insertan la matriz de sensores, se conecta el cable de datos y se presiona el botón  iniciar la visualización y adquisición de los datos de temperatura. Una vez que la película de fluido más cercana a la pared del molde se ha enfriado al punto en que cambia de fase, comienza a formar una capa de hielo, que irá aumentando hasta completar el volumen total.

Figura 59. Etapa de enfriamiento de agua y generación de hielo



Fuente: Autores

6.2 Etapa de estudio de datos adquiridos en el proceso

Con los datos obtenidos en el informe se realizarán cálculos para hallar la velocidad de formación de hielo con respecto al tiempo y también se podrán generar gráficas comparativas sobre la velocidad de formación de hielo con respecto al tiempo.

De acuerdo a los resultados y las gráficas observadas se podrán emitir conclusiones y comentarios acerca de las experiencias realizadas.

6.2.1 PRÁCTICA # 1. Cálculo de la velocidad de generación de hielo (agua ablandada)

En esta práctica se evaluará la velocidad de formación del hielo a partir de agua ablandada, obtenida del ablandador disponible en el Laboratorio de Energía)

La experiencia se realizó bajo las siguientes condiciones:

- Hora de inicio de la prueba: 09h00
- Temperatura ambiente: 21°C
- Temperatura del agua : 18°C
- Temperatura salmuera -8°C (variación entre -9 y -7 °C)
- Tipo de agua Normal.

Se valorará el espesor de la pared de hielo que se va formando con el transcurso del tiempo. En la siguiente figura se muestra el detalle de que se medirá.

Figura 60. Detalle de medición de espesor de pared formado con el tiempo



Fuente: Autores

Resultados obtenidos. En la tabla que se presenta a continuación se muestra el espesor de pared que se forma en el proceso, obteniendo los datos cada hora.

Tabla 30. Espesor de pared de hielo formado cada hora

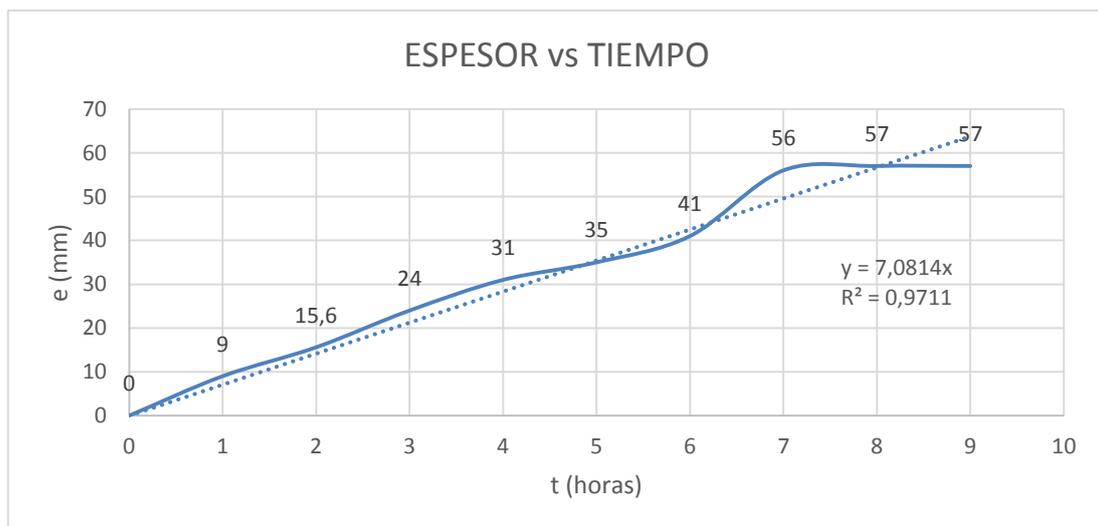
Tiempo (h)	Espesor (mm)	Gráfico
1	9	
2	15,6	
3	24	
4	31	
5	35	

6	41	
7	56-20	
8	57-12	
9	57-5	
10	57	

Fuente: Autores

En la figura 61 se representa las curvas de espesor de hielo en función del tiempo

Figura 61. Curvas de temperatura Vs tiempo



Fuente: Autores

Después de analizar las curvas y realizar la linealización se puede obtener la ecuación de la velocidad de formación del hielo:

$$e = 7,0814 * t$$

$$V = \frac{e}{t} = 7,0814 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$$

Dónde

V = velocidad lineal de formación de hielo

e = espesor de hielo expresado en milímetros

t = tiempo transcurrido en horas

Transformando podemos obtener la velocidad de formación en mm/s

$$V = \frac{e}{t} = 0,0019671 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Además calculamos la velocidad másica de formación de hielo, la cual la calculamos conociendo que la masa es 5 kg y el tiempo es 9 hr aproximadamente

$$V_m = \frac{m}{t} = \frac{5 \text{ kg}}{9 \text{ hr}} = 0,5556 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$V_m = 0,1543 \frac{\text{gr}}{\text{s}}$$

6.2.2 PRÁCTICA # 2. Cálculo de la velocidad de generación de hielo (agua normal)

En esta práctica se evaluará la velocidad de formación de hielo a partir de agua ablandada, pero en este caso se tomará el tiempo total de formación del hielo.

Condiciones de la práctica:

- Hora de inicio de la prueba: 09h45
- Temperatura ambiente: 20°C
- Temperatura del agua : 17°C
- Temperatura salmuera -7,5°C (variación entre -8,5 y -6,5 °C)
- Tipo de agua Ablandada.
- Hora de culminación: 20h17

Con estos datos podemos obtener la velocidad másica de formación de hielo, la cual la calculamos conociendo que la masa es 5 kg y el tiempo de formación del hielo fue de 10 hr y 17 min aproximadamente

$$V_m = \frac{m}{t} = \frac{5 \text{ kg}}{10,2833 \text{ hr}} = 0,4862 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$V_m = 0,1351 \frac{\text{gr}}{\text{s}}$$

6.3.3 PRÁCTICA # 3. Velocidad de descongelamiento.

En esta práctica se puso a prueba la resistencia del bloque de hielo a retornar a su estado original para lo cual se tomaron dos bloques de hielo obtenido a partir de agua ablandada, se los coloco en dos situaciones diferentes, las cuales se detallan seguido.

Condición 1: ambiente controlado. El bloque de hielo se lo ubico en el interior del laboratorio, donde las condiciones climáticas son menos severas, el viento relativamente no corre y el sol no impacta directamente.

Condición 2: ambiente exterior. El segundo bloque se lo ubico en los exteriores del laboratorio, en donde las condiciones climáticas varían drásticamente, velocidad del viento, intensidad del sol, entre otros. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla.

Tabla 31. Resultados de la práctica de descongelamiento

	AMBIENTE	
	EXTERIOR	INTERIOR
Hora de inicio	7:30	8:30
T. amb inicial	18,2 °C	15,8 °C
T. máxima	25 °C	25,2 °C
T. amb final	19,3 °C	25,2 °C
Hora final.	20:25	14:10
tiempo	12:55	6:40

Fuente: Autores

Como se puede observar en la tabla en el ambiente exterior el proceso de descongelamiento duro 6h40 mientras que en el interior duro 12h55, es decir casi el doble de tiempo.

Con estos resultados se puede decir que se en un lugar apropiado para el almacenamiento del hielo se tienen perdidas mínimas del producto.

Ahora se calcula de velocidad de descongelamiento.

$$V_m = \frac{m}{t} = \frac{5 \text{ kg}}{12,9167 \text{ hr}} = 0,3871 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$V_m = 0,1075 \frac{\text{gr}}{\text{s}}$$

Se puede notar que la velocidad de descongelamiento es menor que la velocidad de congelación, siendo esto muy beneficioso para la producción.

6.3.4 PRÁCTICA # 4. Adquisición de datos y cálculo de la velocidad de enfriamiento

En esta práctica se realizara la adquisición de datos de temperatura en el proceso de enfriamiento del agua. Para lo cual se tomaran lecturas de los sensores cada ½ minuto (30 segundos) hasta que la temperatura del agua sea los más cercano a cero, en este caso se resolvió bajar hasta 0,5°C.

Las condiciones de la práctica fueron:

- Hora de inicio de la prueba: 10h00
- Temperatura ambiente: 18,8°C
- Temperatura del agua : 17,87°C
- Temperatura salmuera -8°C (variación entre -8,5 y -7,5 °C)
- Tipo de agua Ablandada.

Las lecturas de temperatura de cada sensor se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 32. Datos de temperatura respecto al tiempo

Temperatura (°C)												
tiempo	y				x				z			
min	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,00	17,87	17,81	17,81	17,69	17,81	17,81	17,81	17,81	17,69	17,62	17,81	17,69
0,50	17,87	17,75	17,69	16,62	17,56	17,69	17,56	17,5	17,56	17,44	17,5	17,44
1,00	17,94	17,69	17,12	14,75	16,81	17,19	16,87	16,81	16,94	16,69	16,81	16,75
1,50	17,87	17,37	16	13,56	16	16,25	16	15,94	15,94	15,81	16	15,88
2,00	17,81	16,87	15,6	12,38	15,19	15,31	15,13	15,06	15,06	15	15,06	14,94
2,50	17,69	16,31	14,19	11,19	14,25	14,44	14,25	14,13	14,19	14,13	14,19	14,06
3,00	17,56	15,81	13,25	10,19	13,44	13,56	13,38	13,31	13,31	13,25	13,31	13,25
3,50	17,37	15,19	12,38	9,31	12,56	12,69	12,56	12,44	12,5	12,44	12,5	12,38
4,00	17,6	14,63	11,5	8,5	11,81	11,94	11,75	11,63	11,69	11,63	11,69	11,63
4,50	16,81	13,94	10,75	7,81	11,06	11,19	11	10,94	10,94	10,88	10,94	10,88
5,00	16,44	13,38	10,06	7	10,38	10,5	10,31	10,19	10,31	10,19	10,25	10,19
5,50	16,12	12,75	9,38	6,25	9,75	9,88	9,69	9,63	9,69	9,56	9,63	9,56
6,00	15,81	12,19	8,81	5,69	9,19	9,31	9,13	9,06	9,06	9	9,06	8,94
6,50	15,44	11,63	8,13	4,75	8,63	8,69	8,5	8,44	8,56	8,31	8,44	8,31
7,00	15,13	11,13	7,31	4,44	8	8,06	7,75	7,63	6	7,63	7,75	6,94
7,50	14,81	10,63	6,63	4,63	7	7,25	6,75	4,94	4,44	7	6,88	5,63
8,00	14,44	10,13	6,06	4,75	5,88	6,75	6,25	3,75	3,06	6,44	6,31	4,13
8,50	14,13	9,56	5,81	4,75	4,38	5,75	5,63	2,75	2,63	5,63	5,94	3,6
9,00	13,75	8,44	5,44	4,69	3	4,88	5,25	2,69	2,56	5,44	5,19	2,69
9,50	13,25	7,44	5,19	4,63	3,13	4,69	5,13	2,88	2,81	5	4,81	2,63
10,00	12,81	6,44	4,69	4,56	3,19	4,63	4,94	2,88	2,75	4,25	4,38	2,56
10,50	12,31	5,44	4,06	4,5	3,44	4,56	4,56	2,81	2,75	3,94	4	2,5
11,00	11,88	4,44	3,56	4,5	3,31	4,44	4,06	2,81	2,75	3,88	3,75	2,63
11,50	11,5	4,81	3,75	4,44	3,06	4	3,75	2,81	2,75	3,81	3,75	2,56
12,00	11,13	4,69	3,63	4,38	3	3,56	3,5	2,75	2,75	3,75	3,63	2,56
12,50	10,75	4,60	3,56	4,31	2,88	3,56	3,25	2,75	2,69	3,63	3,38	2,5
13,00	10,44	4,56	3,56	4,25	2,81	3,31	3,06	2,75	2,69	3,38	3,13	2,5
13,50	10,13	5	3,38	3,88	2,81	3,19	3,13	2,75	2,63	3,19	3,06	2,44
14,00	9,75	4,69	3,25	3,56	2,75	3,06	3,19	2,69	2,63	3,13	3,25	2,5
14,50	9,5	4,75	3,13	3,5	2,69	3,06	3,13	2,69	2,56	3,06	3,38	2,44
15,00	9,19	4,63	3,06	3,44	2,75	3,25	3,19	2,69	2,5	2,94	3,38	2,44
15,50	8,88	4,69	3,06	3,31	2,69	3,06	3,19	2,63	2,5	2,88	3,31	2,38
16,00	8,56	4,25	3	3,25	2,69	3	3,5	2,63	2,44	2,81	3,38	2,38
16,50	8,25	4,31	2,88	3,19	2,69	2,94	3,69	2,63	2,44	2,81	3,31	2,31

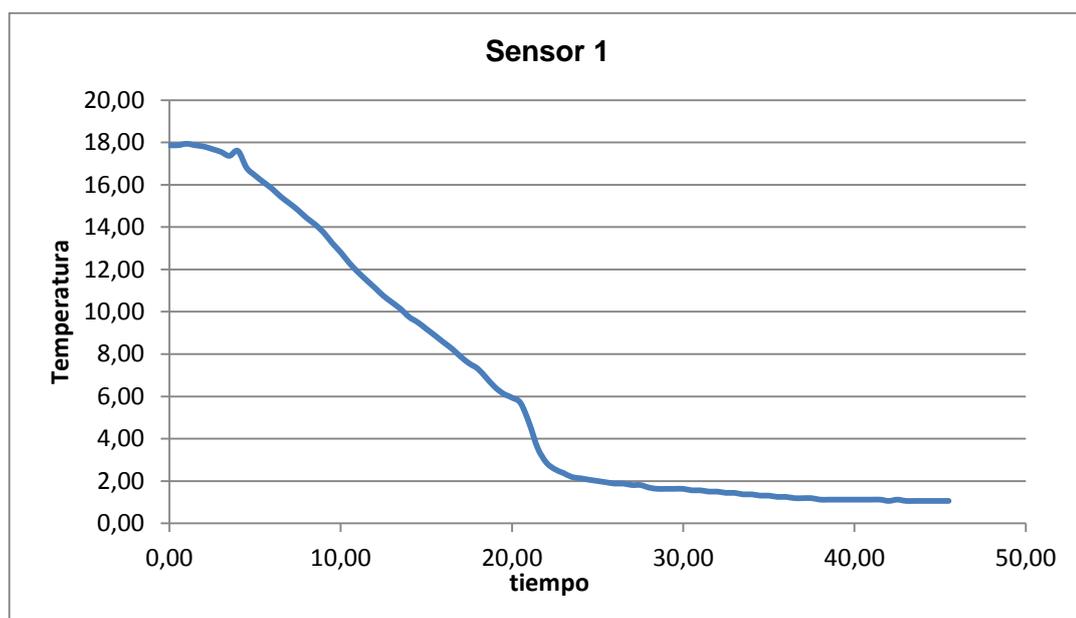
17,00	7,88	4,25	2,88	3,13	2,63	2,81	3,44	2,56	2,38	2,81	3,13	2,25
17,50	7,56	4	2,88	3,06	2,63	2,81	3,38	2,56	2,38	2,81	3	2,19
18,00	7,31	3,75	2,75	3	2,56	2,88	3,25	2,5	2,38	2,69	2,88	2,13
18,50	6,88	3,56	2,75	2,94	2,5	2,88	3,06	2,44	2,31	2,69	2,63	2,06
19,00	6,44	3,38	2,81	2,88	2,5	2,81	2,75	2,38	2,25	2,69	2,5	2
19,50	6,13	2,94	2,75	2,81	2,44	2,75	2,69	2,38	2,19	2,56	2,5	2
20,00	5,94	2,75	2,75	2,81	2,5	2,75	2,56	2,31	2,19	2,5	2,38	1,88
20,50	5,69	2,75	2,69	2,75	2,38	2,75	2,5	2,25	2,13	2,44	2,31	1,88
21,00	4,75	2,88	2,63	2,69	2,25	2,69	2,44	2,19	2,06	2,38	2,25	1,88
21,50	3,56	2,81	2,63	2,69	2,25	2,63	2,31	2,19	2,06	2,38	2,19	1,88
22,00	2,88	2,69	2,56	2,69	2,19	2,5	2,25	2,13	1,94	2,31	2,13	1,81
22,50	2,56	2,5	2,44	2,63	2,19	2,38	2,19	2,06	1,94	2,19	2,06	1,75
23,00	2,38	2,31	2,38	2,56	2,13	2,31	2,19	2	1,81	2,13	2	1,69
23,50	2,19	2,13	2,25	2,5	2,06	2,19	2,19	1,94	1,69	2,19	1,94	1,63
24,00	2,13	1,94	2,19	2,44	2	2,13	2,13	1,88	1,75	2,13	1,94	1,56
24,50	2,06	1,81	2,13	2,38	1,94	2,06	2	1,81	1,69	1,88	1,81	1,5
25,00	2	1,69	2,06	2,31	1,88	1,94	2	1,75	1,56	1,81	1,75	1,44
25,50	1,94	1,56	2	2,25	1,81	1,88	1,88	1,69	1,56	1,75	1,69	1,37
26,00	1,88	1,5	1,88	2,19	1,75	1,81	1,81	1,63	1,5	1,69	1,63	1,25
26,50	1,88	1,37	1,81	2,13	1,69	1,75	1,75	1,56	1,37	1,63	1,56	1,25
27,00	1,81	1,31	1,75	2,06	1,69	1,63	1,69	1,5	1,31	1,56	1,44	1,19
27,50	1,81	1,25	1,69	2	1,56	1,56	1,63	1,5	1,25	1,44	1,37	1,12
28,00	1,69	1,25	1,56	1,94	1,5	1,5	1,5	1,37	1,25	1,37	1,31	1,06
28,50	1,63	1,12	1,5	1,88	1,44	1,44	1,44	1,31	1,12	1,31	1,25	1
29,00	1,63	1,06	1,44	1,81	1,37	1,37	1,37	1,25	1,06	1,25	1,25	0,94
29,50	1,63	1,06	1,37	1,75	1,31	1,25	1,37	1,19	1	1,19	1,19	0,88
30,00	1,63	1	1,31	1,69	1,25	1,25	1,31	1,12	0,94	1,12	1,06	0,81
30,50	1,56	0,94	1,25	1,63	1,25	1,19	1,19	1,06	0,88	1,6	1,06	0,75
31,00	1,56	0,94	1,25	1,56	1,19	1,12	1,19	1	0,88	1	1	0,69
31,50	1,5	0,94	1,19	1,56	1,12	1,06	1,12	0,94	0,81	1	0,94	0,63
32,00	1,5	0,88	1,12	1,5	1,06	1,06	1,06	0,94	0,75	0,94	0,94	0,63
32,50	1,44	0,88	1,06	1,44	1,06	1	1	0,88	0,69	0,88	0,88	0,56
33,00	1,44	0,88	1	1,37	1	0,94	1	0,81	0,69	0,81	0,81	0,56
33,50	1,37	0,81	1	1,31	0,94	0,94	0,94	0,81	0,63	0,81	0,81	0,5
34,00	1,37	0,81	0,94	1,25	0,88	0,88	0,88	0,75	0,56	0,75	0,69	0,44
34,50	1,31	0,81	0,88	1,19	0,88	0,81	0,88	0,69	0,56	0,75	0,69	0,44
35,00	1,31	0,75	0,81	1,19	0,88	0,81	0,81	0,69	0,56	0,69	0,69	0,37
35,50	1,25	0,69	0,81	1,12	0,81	0,75	0,75	0,63	0,5	0,69	0,69	0,37
36,00	1,25	0,69	0,75	1,12	0,75	0,75	0,75	0,63	0,5	0,63	0,56	0,37

36,50	1,19	0,69	0,75	1,06	0,75	0,75	0,75	0,56	0,44	0,63	0,56	0,31
37,00	1,19	0,69	0,69	1	0,75	0,75	0,69	0,56	0,44	0,56	0,56	0,31
37,50	1,19	0,63	0,69	1	0,69	0,69	0,63	0,5	0,37	0,56	0,56	0,31
38,00	1,12	0,63	0,69	0,94	0,69	0,63	0,63	0,5	0,37	0,56	0,5	0,25
38,50	1,12	0,63	0,63	0,88	0,63	0,63	0,63	0,44	0,31	0,5	0,5	0,25
39,00	1,12	0,63	0,56	0,81	0,63	0,63	0,56	0,44	0,31	0,5	0,44	0,19
39,50	1,12	0,56	0,56	0,88	0,63	0,63	0,56	0,37	0,31	0,5	0,44	0,19
40,00	1,12	0,56	0,56	0,81	0,56	0,56	0,56	0,37	0,25	0,44	0,44	0,19
40,50	1,12	0,56	0,56	0,75	0,56	0,56	0,56	0,37	0,25	0,44	0,44	0,12
41,00	1,12	0,56	0,5	0,75	0,56	0,56	0,5	0,37	0,25	0,44	0,44	0,12
41,50	1,12	0,56	0,5	0,69	0,56	0,5	0,5	0,31	0,19	0,44	0,37	0,12
42,00	1,06	0,5	0,5	0,69	0,5	0,5	0,5	0,31	0,19	0,37	0,37	0,12
42,50	1,12	0,56	0,44	0,69	0,5	0,5	0,44	0,31	0,19	0,37	0,31	0,06
43,00	1,06	0,5	0,44	0,63	0,5	0,5	0,44	0,25	0,19	0,31	0,37	0,06
43,50	1,06	0,5	0,44	0,63	0,44	0,44	0,44	0,25	0,19	0,31	0,31	0
44,00	1,06	0,56	0,44	0,56	0,44	0,44	0,37	0,25	0,12	0,31	0,25	0
44,50	1,06	0,56	0,37	0,56	0,44	0,37	0,37	0,25	0,12	0,31	0,19	0
45,00	1,06	0,50	0,37	0,5	0,44	0,44	0,37	0,19	0,60	0,31	0,25	0,00
45,50	1,06	0,44	0,37	0,56	0,44	0,44	0,37	0,19	0,12	0,31	0,31	0,00

Fuente: Autores

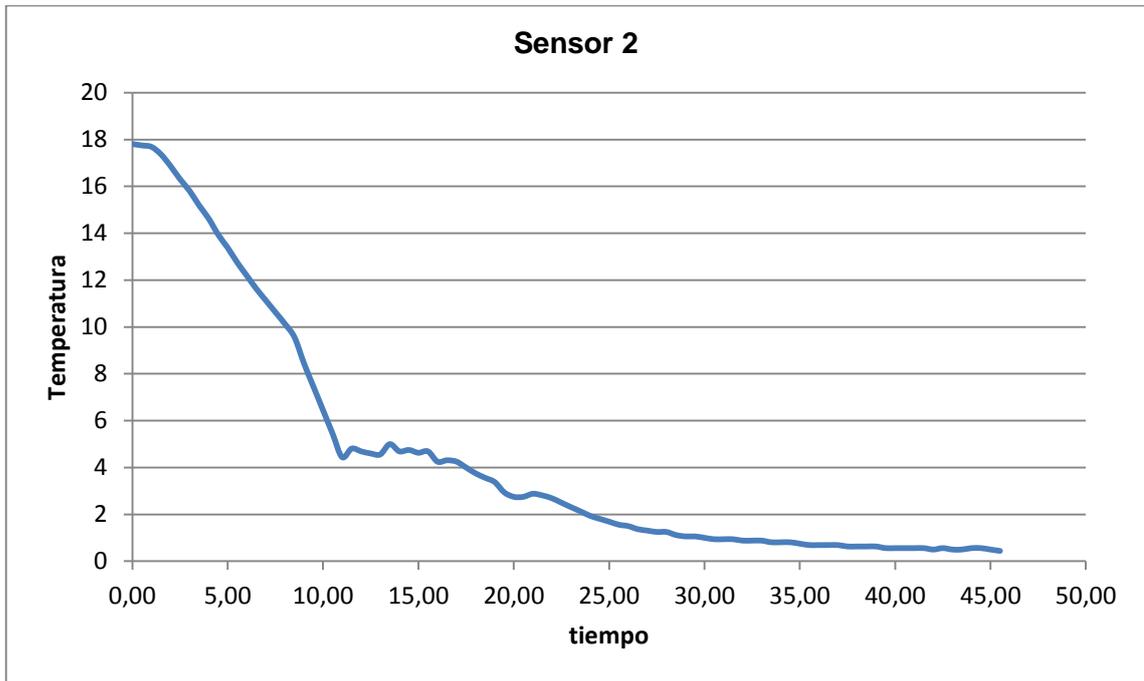
A partir de los datos obtenidos y para un mejor entendimiento de lo obtenido se elaboraron las respectivas de temperatura vs tiempo de cada sensor.

Figura 62. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 1



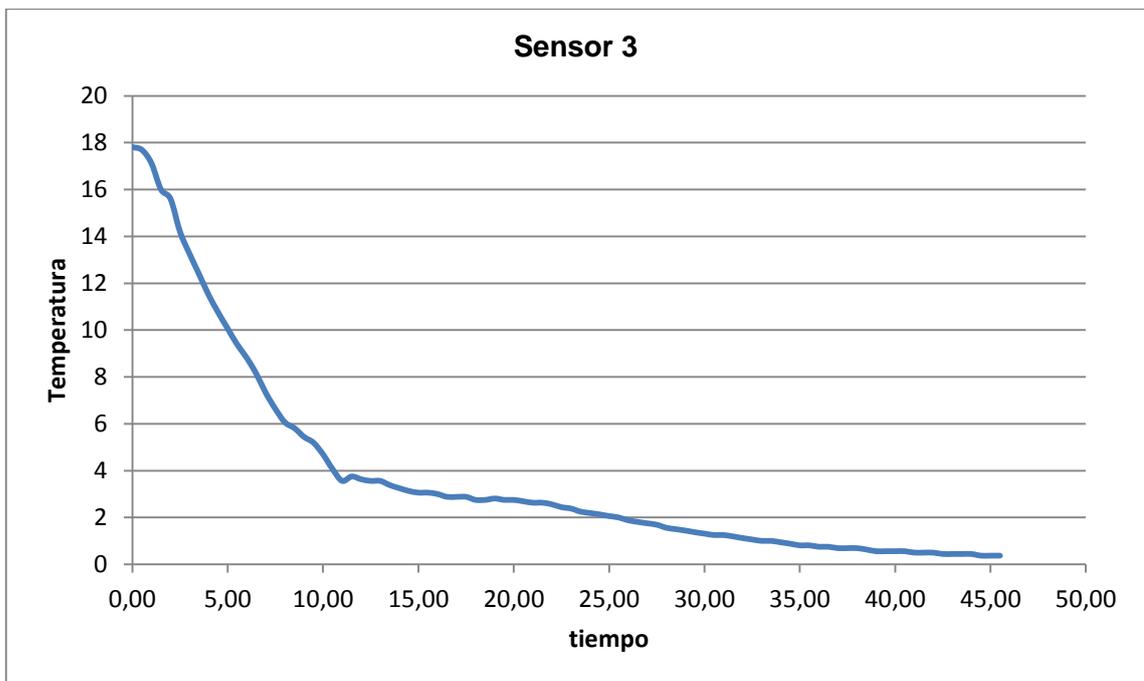
Fuente: Autores

Figura 63. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 2



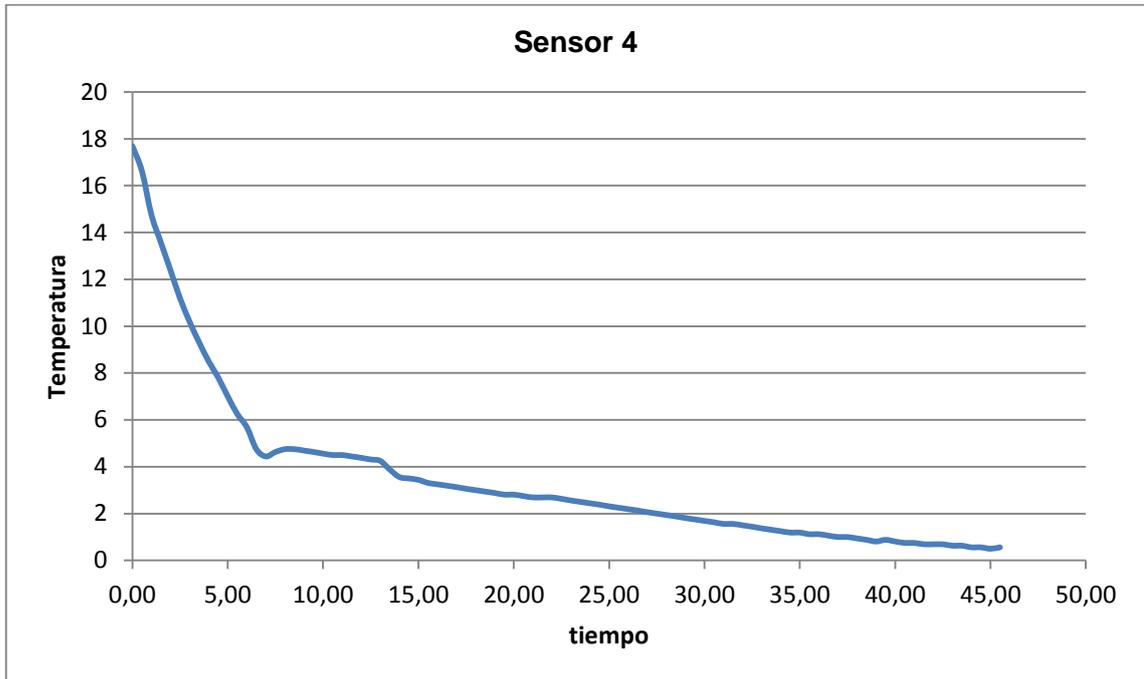
Fuente: Autores

Figura 64. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 3



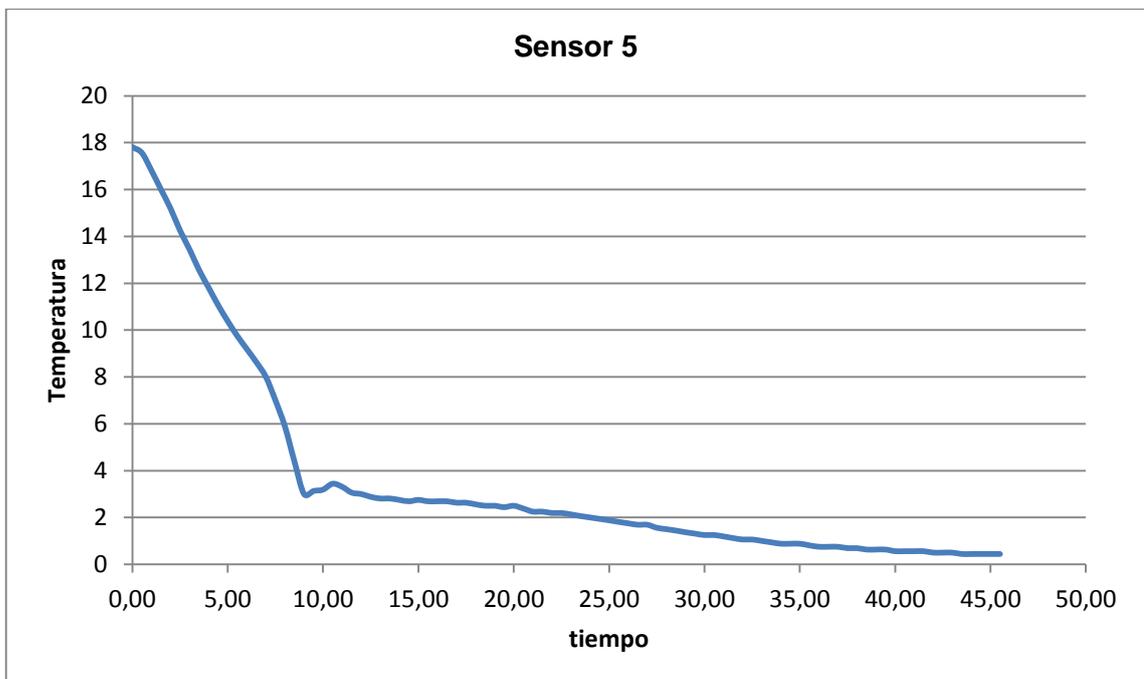
Fuente: Autores

Figura 65. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 4



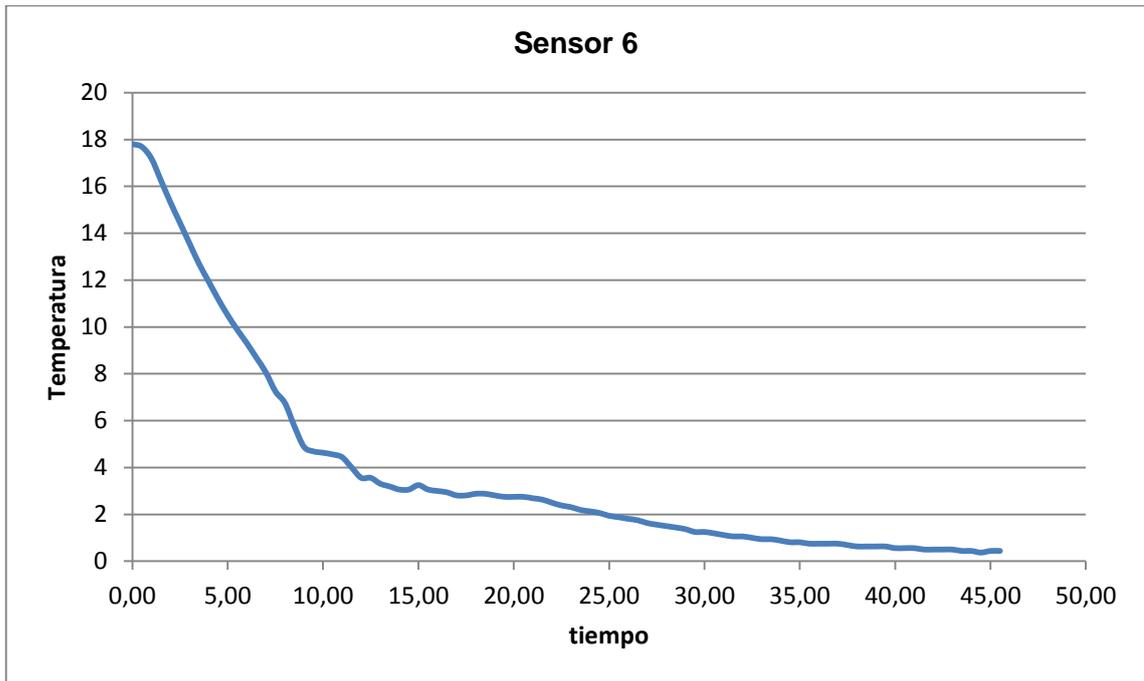
Fuente: Autores

Figura 66. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 5



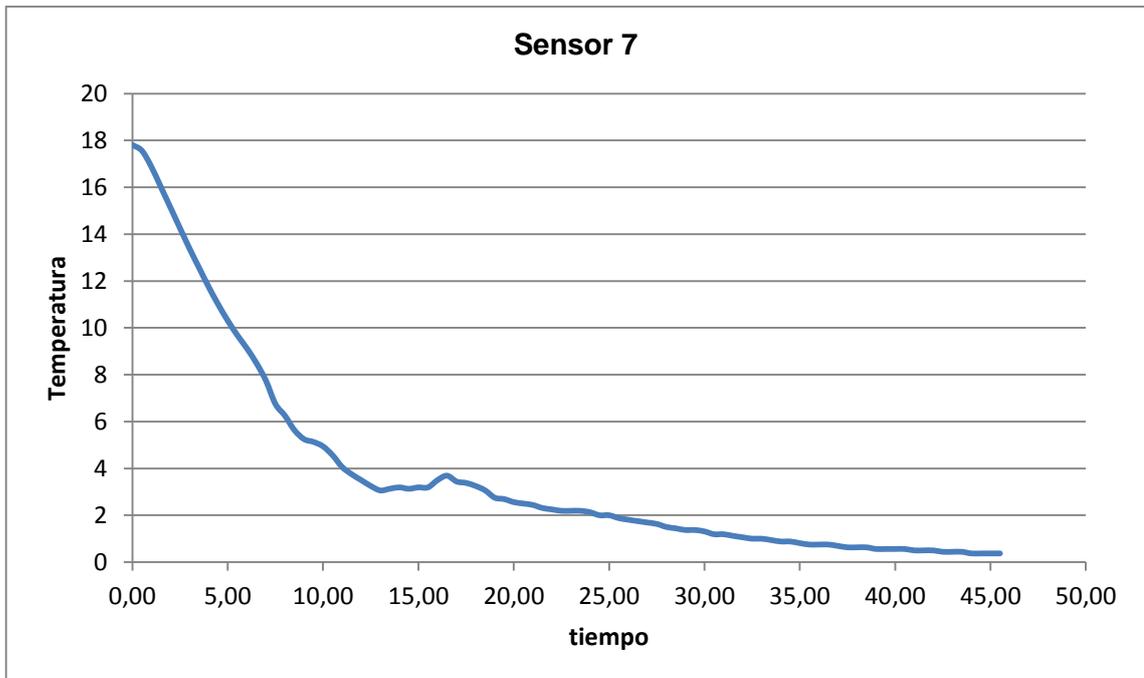
Fuente: Autores

Figura 67. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 6



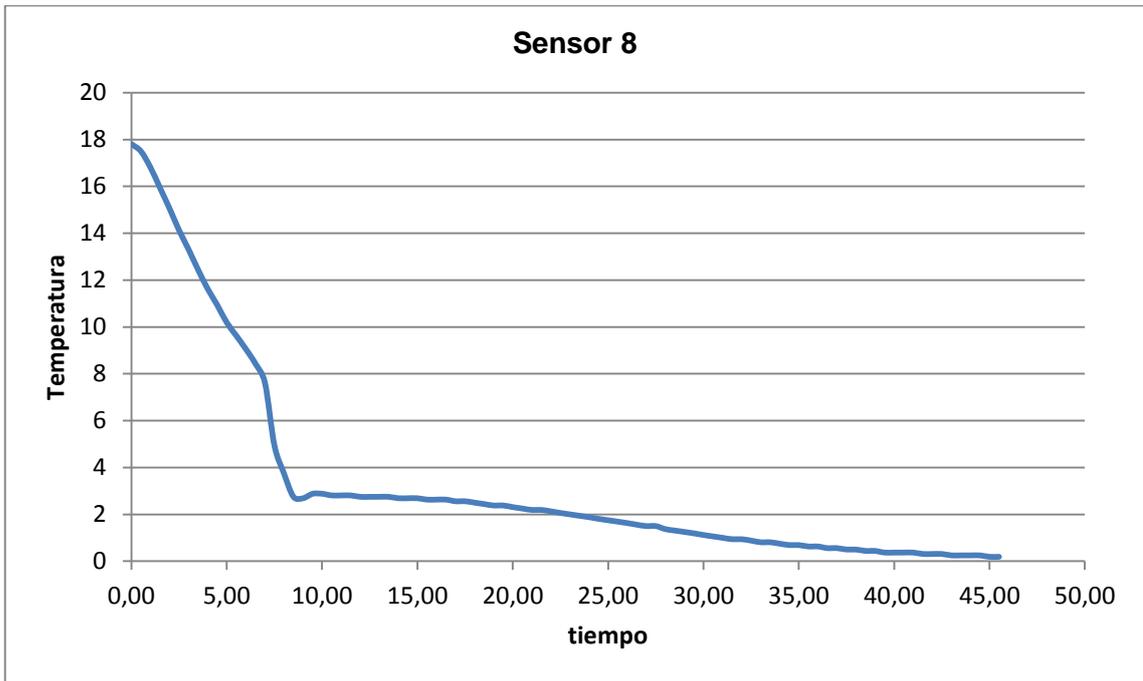
Fuente: Autores

Figura 68. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 7



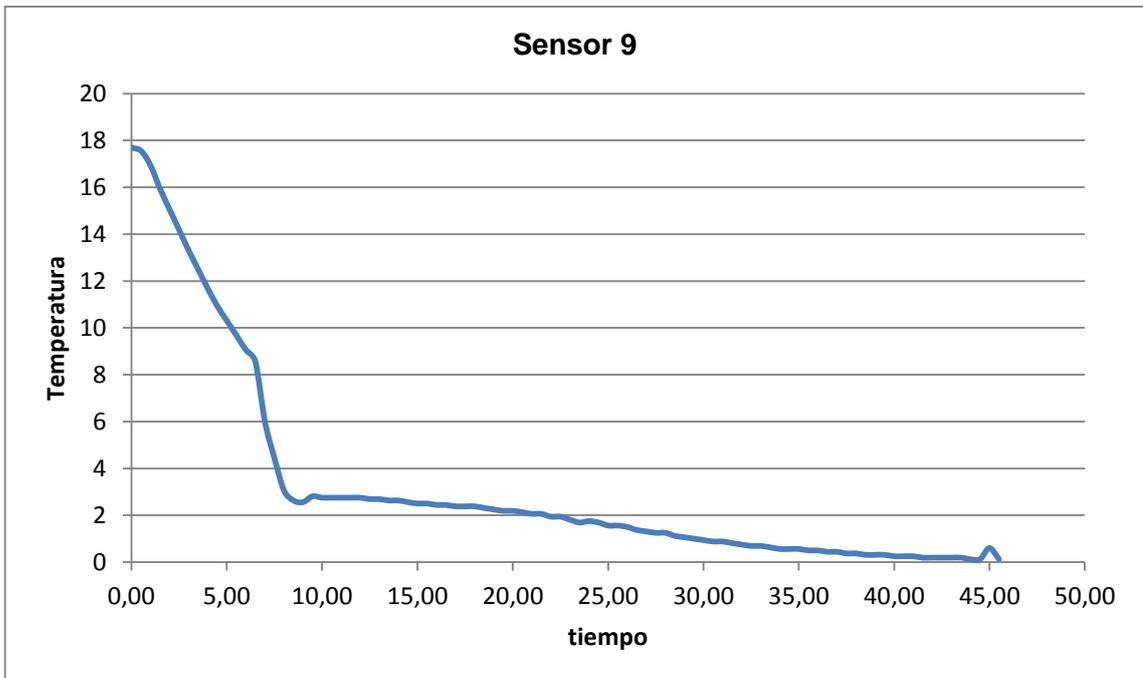
Fuente: Autores

Figura 69. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 8



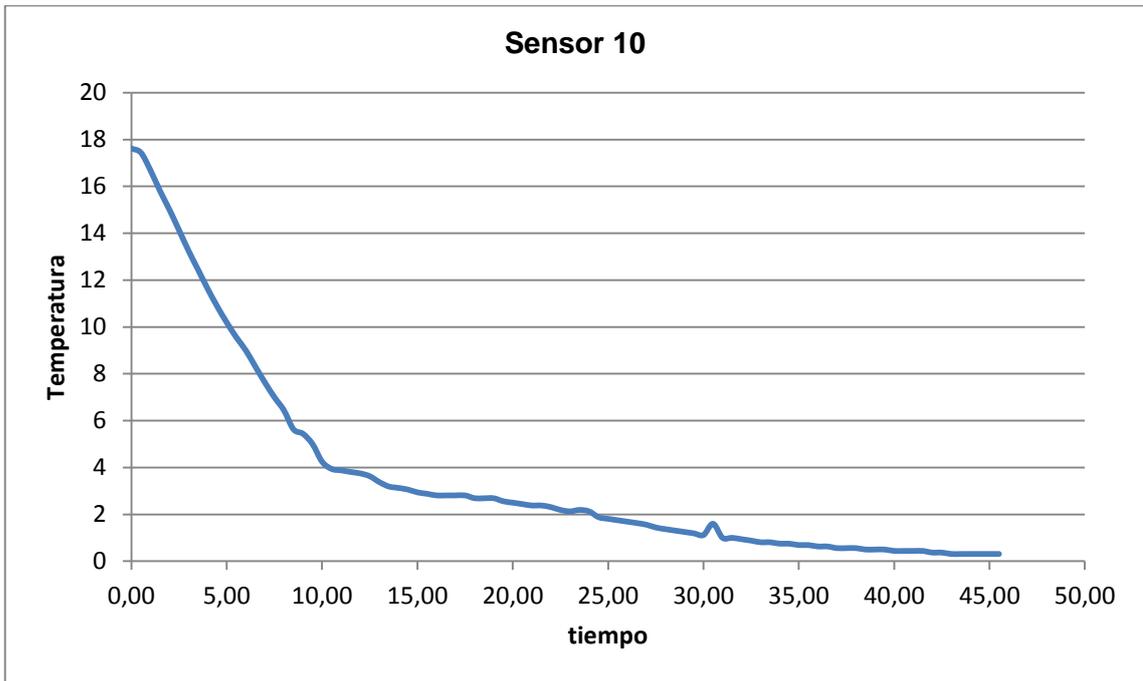
Fuente: Autores

Figura 70. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 9



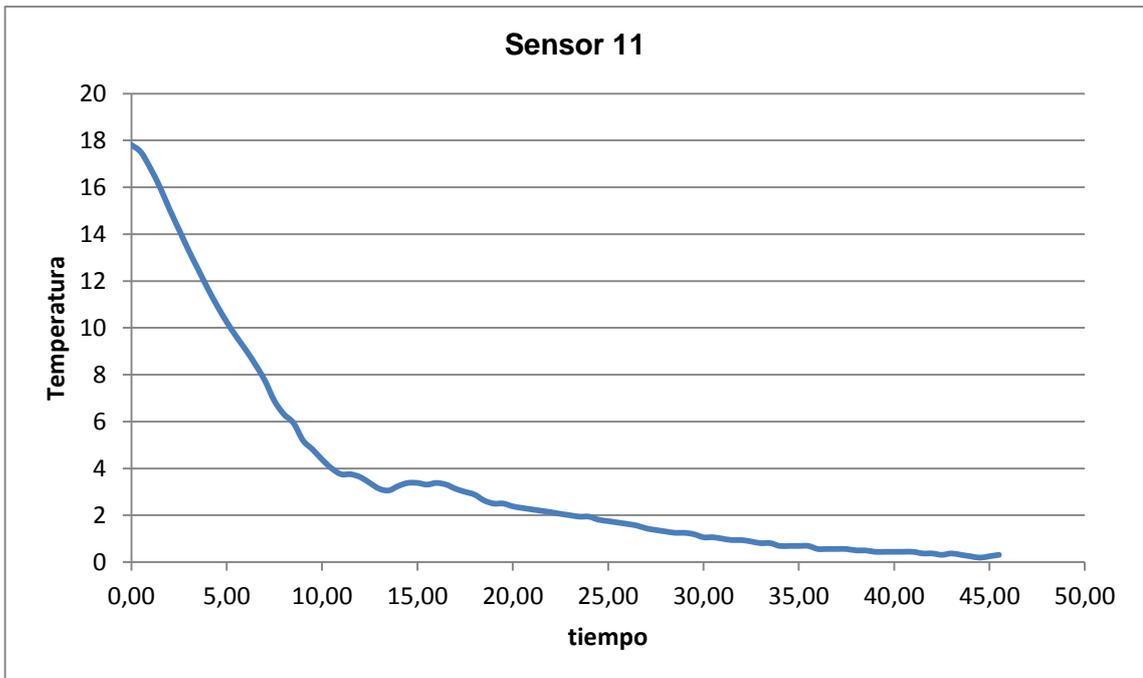
Fuente: Autores

Figura 71. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 10



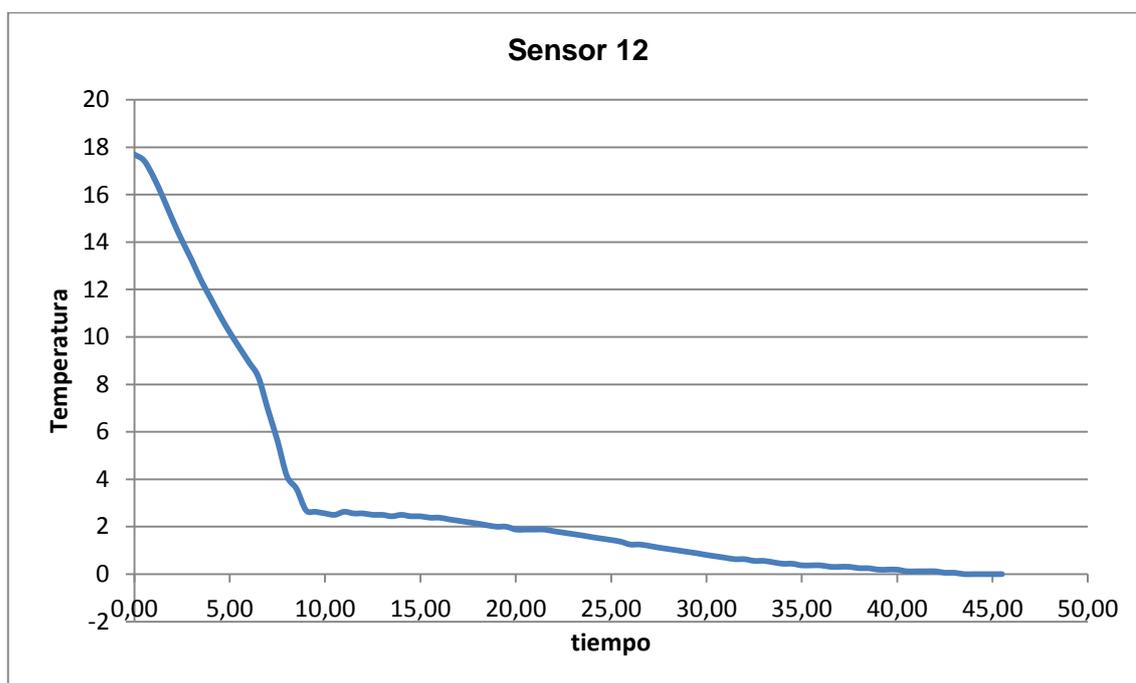
Fuente: Autores

Figura 72. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 11



Fuente: Autores

Figura 73. Curva Temperatura vs tiempo en el sensor 12



Fuente: Autores

A partir de las gráficas haremos un análisis de lo que sucede con la variación de la temperatura.

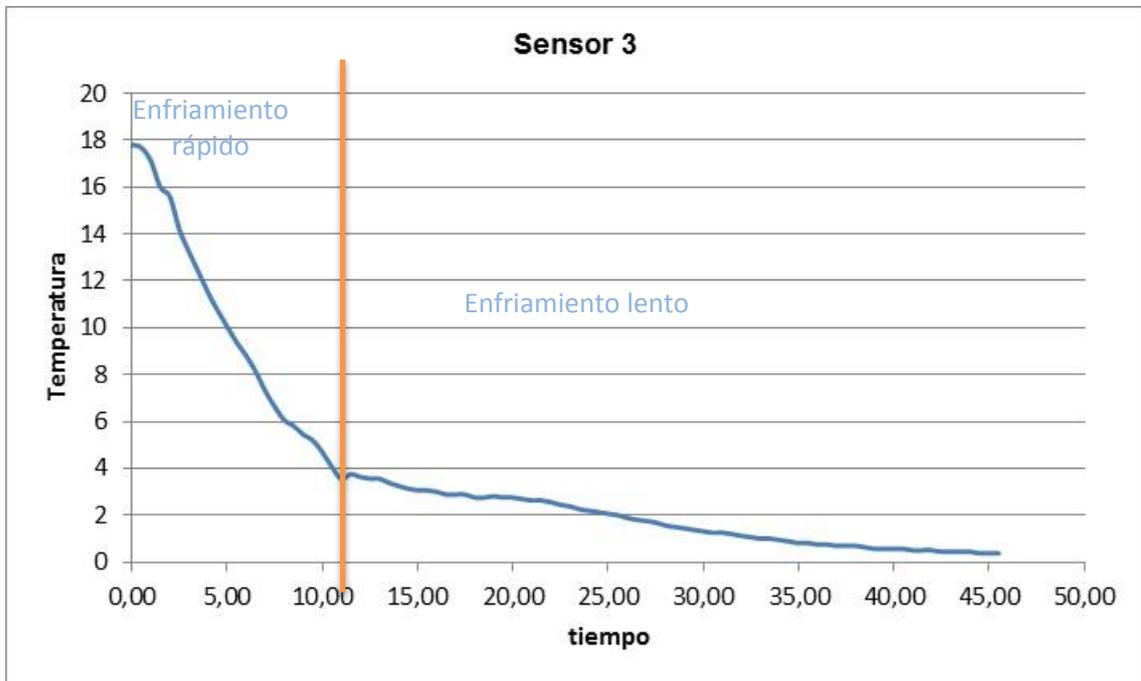
En la gráfica del sensor 1 se puede ver que el descenso de temperatura es más lento y tiene fluctuaciones en el transcurso del proceso, esto se debe a que este sensor se encuentra cerca de la superficie libre del agua en donde le afecta la temperatura del aire que le rodea.

En las gráficas de los sensores 5, 8, 9, 12 y en menor proporción en el sensor 4, se puede apreciar que durante los primeros 10 minutos del proceso el descenso de temperatura tiene un declive (pendiente negativa) alta, descendiendo la temperatura hasta los 3 grados aproximadamente, después de esto el declive se reduce y la curva se suaviza. Esto se debe a que estos sensores están cerca a las paredes del molde que se encuentran en contacto con la salmuera a -8°C y la transferencia de calor es mucho más fuerte en esta zona.

En los demás sensores (2, 3, 6, 7, 10 y 11) las curvas son más suaves, es decir con descenso de temperatura más controlado por encontrarse en la parte media del molde.

En cualquiera de los casos se puede notar que existen dos regiones, una de enfriamiento rápido y otra de enfriamiento lento.

Figura 74. Regiones en las curvas Temperatura vs tiempo



Fuente: autores

El proceso de enfriamiento del agua tomo en total 46 minutos aproximadamente

Cálculo de velocidad de enfriamiento. Para el cálculo de la velocidad de enfriamiento tomaremos un par de datos de temperatura del sensor 3 por encontrarse en la mitad de los tres ejes, se tomaran datos de las dos regiones antes mencionadas.

Velocidad de enfriamiento primera zona.

Tabla 33. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
4,50	10,75
8,50	5,81

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(5,81 - 10,75)^\circ\text{C}}{(8,5 - 4,5)\text{min}}$$

$$V = \frac{-4,94^\circ\text{C}}{4 \text{ min}}$$

$$V = -1,235^\circ\text{C}/\text{min}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{enf}} = 1,235^\circ\text{C}/\text{min}$$

Velocidad de enfriamiento segunda zona

Tabla 34. Datos de la zona de enfriamiento lento

t	T
23,00	2,38
32,00	1,12

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(1,12 - 2,38)^\circ\text{C}}{(32 - 23)\text{min}}$$

$$V = \frac{-1,26^\circ\text{C}}{9 \text{ min}}$$

$$V = -0,14^\circ\text{C}/\text{min}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{enf}} = 0,14 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$

6.3.5 PRÁCTICA # 5. Adquisición de datos y cálculo de la velocidad de enfriamiento del agua

En esta práctica se realizara la adquisición de datos de temperatura en el proceso de enfriamiento del agua. Para lo cual se tomaran lecturas de los sensores cada ½ minuto (30 segundos) hasta que la temperatura del agua sea los más cercano a cero, en este caso se resolvió bajar hasta 0,5°C.

Las condiciones de la práctica fueron:

- Hora de inicio de la prueba: 10h00
- Temperatura ambiente: 19,3°C
- Temperatura del agua : 17,4°C
- Temperatura salmuera -8°C (variación entre -8,5 y -7,5 °C)
- Tipo de agua Normal.

Los datos de temperatura adquiridos por los sensores se presentan en el ANEXO G.

Las gráficas realizadas a partir de los datos de temperatura se encuentran en el ANEXO H.

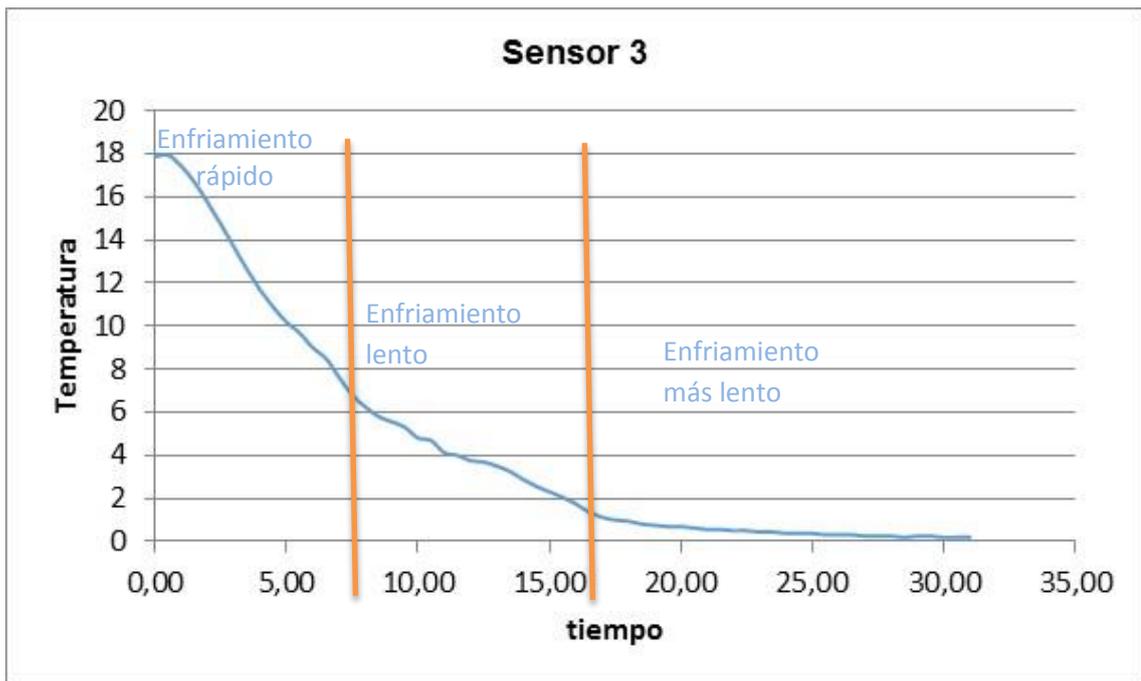
De igual manera que en la práctica anterior en base a las gráficas haremos un análisis de lo que sucede con la variación de la temperatura.

En la gráfica del sensor 1 se puede ver que el descenso de temperatura es más lento y tiene fluctuaciones en el transcurso del proceso, esto se debe a que este sensor se encuentra cerca de la superficie libre del agua en donde le afecta la temperatura del aire que le rodea.

En las gráficas de los sensores 5, 8, 9, 12 y en menor proporción en el sensor 4, se puede apreciar que durante los primeros 9 minutos del proceso el descenso de temperatura tiene un declive (pendiente negativa) alta, descendiendo la temperatura hasta los 3 grados aproximadamente, después de esto el declive se reduce y la curva se suaviza durante 6 minutos, para después de esto reducir más su declive. Esto se debe a que estos sensores están cerca a las paredes del molde que se encuentran en contacto con la salmuera a -8°C y la transferencia de calor es mucho más fuerte en esta zona.

En los demás sensores (2, 3, 6, 7, 10 y 11) las curvas son más suaves, es decir con descenso de temperatura más controlado por encontrarse en la parte media del molde. En cualquiera de los casos se puede notar que existen tres regiones, una de enfriamiento rápido, la segunda de enfriamiento lento y la tercera de enfriamiento más lento.

Figura 75. Regiones en las curvas Temperatura vs tiempo



Fuente: autores

El proceso de enfriamiento del agua tomo en total 31 minutos aproximadamente

Cálculo de velocidad de enfriamiento. Para el cálculo de la velocidad de enfriamiento tomaremos un par de datos de temperatura del sensor 3 por encontrarse en la mitad de los tres ejes, se tomaran datos de las tres regiones antes mencionadas.

Velocidad de enfriamiento primera zona.

Tabla 35. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
3,00	13,69
7,50	6,81

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(6,81 - 13,69)^\circ\text{C}}{(7,5 - 3)\text{min}}$$

$$V = \frac{-6,88^\circ\text{C}}{4,5 \text{ min}} = -1,5289^\circ\text{C}/\text{min}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{enf}} = 1,5289^\circ\text{C}/\text{min}$$

Velocidad de enfriamiento segunda zona

Tabla 36. Datos de la zona de enfriamiento lento

t	T
9,50	5,31
15,50	2,06

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(2,06 - 5,31)^\circ\text{C}}{(15,5 - 9,5)\text{min}}$$

$$V = \frac{-3,25^\circ\text{C}}{6\text{ min}} = -0,5417^\circ\text{C}/\text{min}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{enf}} = 0,5417^\circ\text{C}/\text{min}$$

Velocidad de enfriamiento tercera zona.

Tabla 37. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
18,50	0,81
24,00	0,37

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(0,37 - 0,81)^\circ\text{C}}{(24 - 18,5)\text{min}}$$

$$V = \frac{-0,44^\circ\text{C}}{5,5\text{min}}$$

$$V = -0,08^\circ\text{C}/\text{min}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{enf}} = 0,08 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$

6.3.6 PRÁCTICA # 6. Adquisición de datos y cálculo de la velocidad de formación de hielo

En esta práctica se realizara la adquisición de datos de temperatura en el proceso de formación de hielo. Para lo cual se tomaran lecturas de temperatura a través de los sensores cada 5 minutos hasta que el equipo se detenga automáticamente.

Las condiciones de la práctica fueron:

- Hora de inicio de la prueba: 10h25
- Temperatura ambiente: 19,0°C
- Temperatura del agua : 17,0°C
- Temperatura salmuera -8°C (variación entre -8,5 y -7,5 °C)
- Tipo de agua Ablandada.

Los datos de temperatura adquiridos por los sensores se presentan en el ANEXO I.

Las gráficas realizadas a partir de los datos de temperatura se encuentran en el ANEXO J.

De igual manera que en las prácticas anteriores en base a las gráficas haremos un análisis de lo que sucede con la variación de la temperatura.

En la gráfica del sensor 1 se puede ver que el descenso de temperatura es rápido hasta llegar cerca de cero, pero después de esto le toma mucho tiempo llegar al punto de solidificación, además en punto de solidificación es transitorio como se puede ver en las gráficas, considerando además que tiene fluctuaciones en el transcurso del proceso, esto se debe a que este sensor se encuentra cerca de la superficie libre del agua en donde le afecta la temperatura del aire que le rodea.

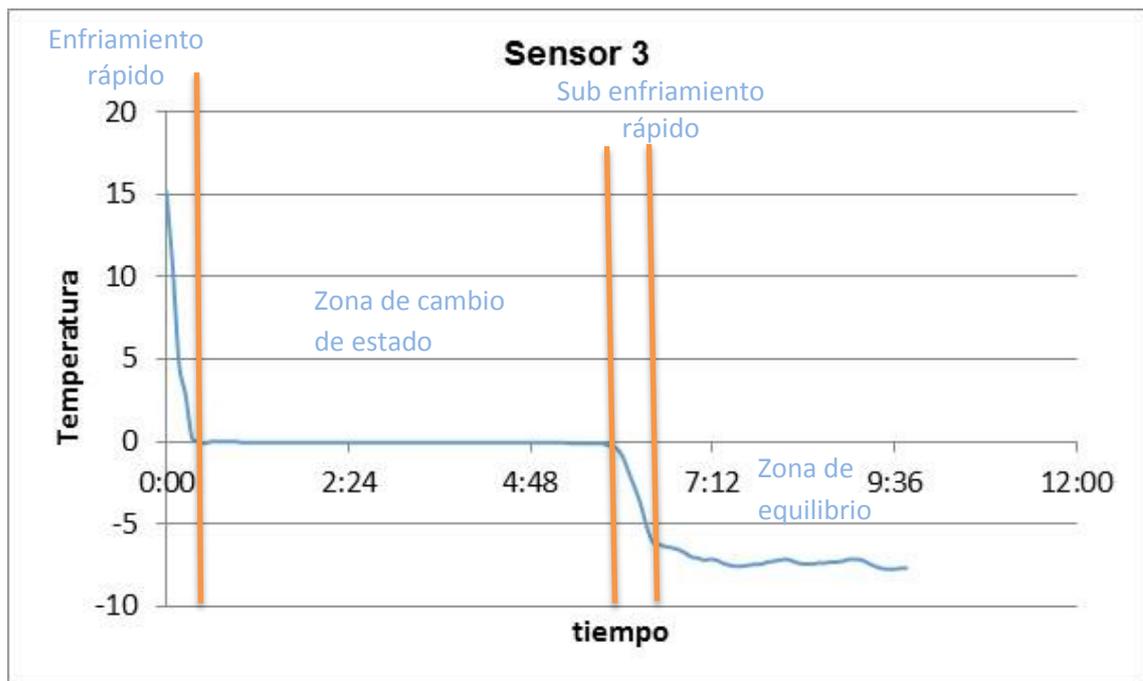
En las gráficas de los sensores 5, 8, 9 y 12, se puede apreciar que durante los primeros 16 minutos aproximadamente del proceso el descenso de temperatura tiene un declive (pendiente negativa) altísimo, descendiendo la temperatura hasta los 0 grados literalmente, después de esto el declive se reduce a cero y la curva se mantiene hasta alrededor de la segunda hora del proceso, para después de esto tomar un declive no tan pronunciado por un periodo largo hasta la séptima hora del proceso y finalmente estabilizarse en una pendiente cero, pero que no se logra por las fluctuaciones.

Este descenso rápido de la temperatura hasta llegar a cero se debe a que los sensores están cerca a las paredes del molde que se encuentran en contacto con la salmuera a -8°C y la transferencia de calor es mucho más fuerte en esta zona, por esta misma razón el resto del proceso es más suave, no tiene cambios bruscos de temperatura.

En los demás sensores (2, 3, 4, 6, 7, 10 y 11) las curvas son más bruscas (pendientes más inclinadas), esto se debe a que se encuentran en la parte media del molde y se debe esperar a que el hielo ya formado en las paredes se sub enfrié.

En cualquiera de los casos se puede notar que existen cuatro regiones, una de enfriamiento rápido, la segunda de transición y la tercera de sub enfriamiento rápido y la última de reposo.

Figura 76. Regiones en las curvas Temperatura vs tiempo



Fuente: Autores

El proceso de formación de hielo tomo en total 9h50 aproximadamente

Cálculo de velocidad de formación de hielo. Para el cálculo de la velocidad de formación de hielo tomaremos un par de datos de temperatura al azar del sensor 3, por encontrarse en la mitad de los tres ejes, se elegirán los datos de las tres regiones antes mencionadas.

Velocidad de enfriamiento primera zona.

Tabla 38. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
0:05	10,44
0:15	2,88

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(2,88 - 10,44)^\circ\text{C}}{(0,25 - 0,0833)\text{h}}$$

$$V = \frac{-7,56^\circ\text{C}}{0,1667\text{h}}$$

$$V = -45,3509^\circ\text{C}/\text{h}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{form}} = 45,3509^\circ\text{C}/\text{h}$$

Velocidad de transición, segunda zona

Tabla 39. Datos de la zona de enfriamiento lento

t	T
1:00	-0,06
4:45	-0,06

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(-0,6 - (-0,6))^{\circ}\text{C}}{(4,75 - 1)\text{min}}$$

$$V = \frac{0^{\circ}\text{C}}{3,75\text{min}}$$

$$V = 0^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

Velocidad de sub enfriamiento, tercera zona.

Tabla 40. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
6:05	-1,75
6:35	-6,38

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(-6,38 - (-1,75))^{\circ}\text{C}}{(6,5833 - 6,0833)\text{h}}$$

$$V = \frac{-4,63 \text{ }^{\circ}\text{C}}{0,5\text{h}}$$

$$V = -9,26 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{form}} = 9,26 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

Velocidad de reposo, cuarta zona.

Tabla 41. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
7:10	-7,13
8:25	-7,44

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(-7,44 - (-7,13))^{\circ}\text{C}}{(8,4167 - 7,1667)\text{min}}$$

$$V = \frac{-0,31 \text{ }^{\circ}\text{C}}{1,25 \text{ h}} = -0,248 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{form}} = 0,248 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

6.3.7 PRÁCTICA # 7. Adquisición de datos y cálculo de la velocidad de formación de hielo

En esta práctica se realizara la adquisición de datos de temperatura en el proceso de formación de hielo. Para lo cual se tomaran lecturas de los sensores cada 10 minutos hasta que el equipo se detenga automáticamente.

Las condiciones de la práctica fueron:

- Hora de inicio de la prueba: 10h00
- Temperatura ambiente: 19,3°C
- Temperatura del agua : 17,4°C
- Temperatura salmuera -8°C (variación entre -8,5 y -7,5 °C)
- Tipo de agua Normal.

Los datos de temperatura adquiridos por los sensores se presentan en el ANEXO K.

Las gráficas realizadas a partir de los datos de temperatura se encuentran en el ANEXO L.

De igual manera que en las prácticas anteriores en base a las gráficas haremos un análisis de lo que sucede con la variación de la temperatura.

En la gráfica del sensor 1 se puede ver que el descenso de temperatura es rápido hasta llegar cerca de cero, pero después de esto le toma mucho tiempo llegar al punto de solidificación, además en punto de solidificación es transitorio como se puede ver en las gráficas, considerando además que tiene fluctuaciones en el transcurso del proceso, esto se debe a que este sensor se encuentra cerca de la superficie libre del agua en donde le afecta la temperatura del aire que le rodea.

En las gráficas de los sensores 5, 8, 9 y 12, se puede apreciar que durante los primeros 18 minutos aproximadamente del proceso el descenso de temperatura tiene un declive altísimo, descendiendo la temperatura hasta los 0 grados literalmente, después de esto el declive se reduce a cero y la curva se mantiene hasta alrededor de la primera hora y media del proceso, para después de esto tomar un declive no tan pronunciado por un

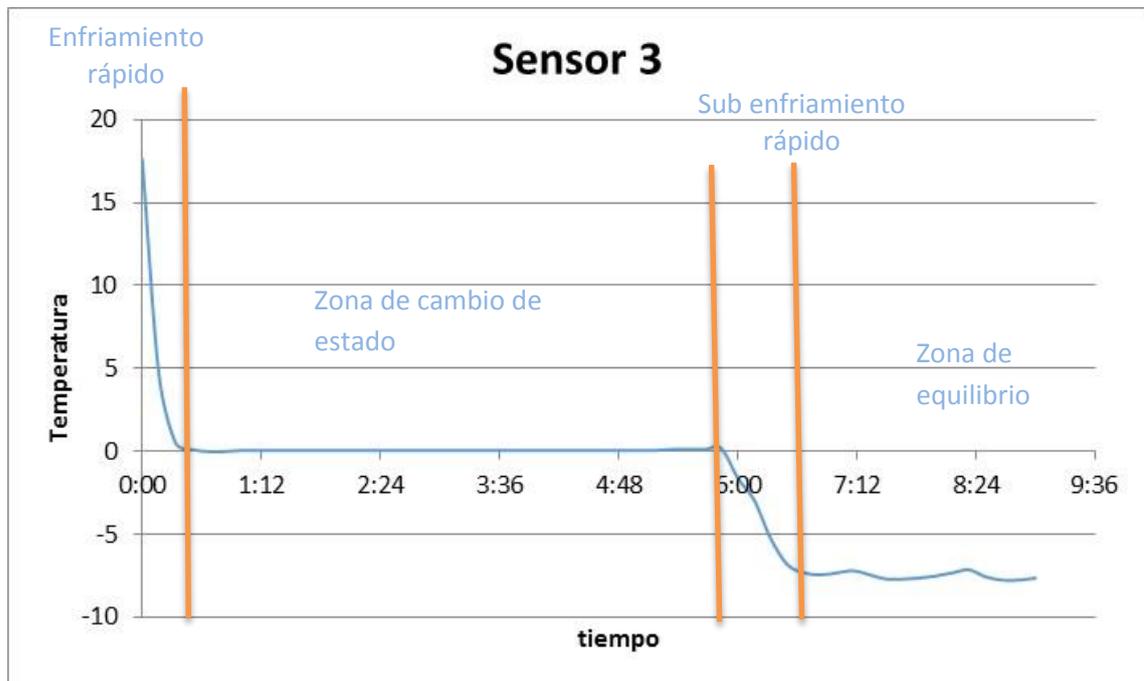
periodo largo hasta la séptima hora del proceso y finalmente estabilizarse en una pendiente cero, pero que no se logra por las fluctuaciones.

Este descenso rápido de la temperatura hasta llegar a cero se debe a que los sensores están cerca a las paredes del molde que se encuentran en contacto con la salmuera a -8°C y la transferencia de calor es mucho más fuerte en esta zona, por esta misma razón el resto del proceso es más suave, no tiene cambios bruscos de temperatura.

En los demás sensores (2, 3, 4, 6, 7, 10 y 11) las curvas son más bruscas (pendientes más inclinadas), esto se debe a que se encuentran en la parte media del molde y se debe esperar a que el hielo ya formado en las paredes se sub enfrié.

En cualquiera de los casos se puede notar que existen cuatro regiones, una de enfriamiento rápido, la segunda de transición y la tercera de sub enfriamiento rápido y la última de reposo.

Figura 77. Regiones en las curvas Temperatura vs tiempo



Fuente: autores

El proceso de formación de hielo tomo en total 9 horas aproximadamente

Cálculo de velocidad de formación de hielo. Para el cálculo de la velocidad de formación tomaremos un par de datos de temperatura del sensor 3 por encontrarse en la mitad de los tres ejes, se tomaran datos de las tres regiones antes mencionadas.

Velocidad de enfriamiento primera zona.

Tabla 42. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
0:00	17,62
0:30	0,12

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(0,12 - 17,62)^\circ\text{C}}{(0,5 - 0,0)\text{h}}$$

$$V = \frac{-17,5^\circ\text{C}}{0,5\text{ h}} = -35,00^\circ\text{C}/\text{h}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{form}} = 35,00^\circ\text{C}/\text{h}$$

Velocidad de transición, segunda zona

Tabla 43. Datos de la zona de enfriamiento lento

t	T
1:20	0,06
4:50	0,06

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(0,6 - 0,6)^\circ\text{C}}{(4,8333 - 1,333)\text{min}}$$

$$V = \frac{0^\circ\text{C}}{3,5\text{min}} = 0^\circ\text{C}/\text{min}$$

Velocidad de sub enfriamiento, tercera zona.

Tabla 44. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
6:00	-1,6
6:30	-6,81

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(-6,81 - (-1,6))^\circ\text{C}}{(6,5 - 6,0)\text{h}}$$

$$V = \frac{-5,21^\circ\text{C}}{0,5\text{h}} = -10,42^\circ\text{C}/\text{h}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{form}} = 10,42^\circ\text{C}/\text{h}$$

Velocidad de reposo, cuarta zona.

Tabla 45. Datos de la zona de enfriamiento rápido

t	T
7:20	-7,44
8:40	-7,75

Fuente: Autores

$$V = \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$V = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{(-7,75 - (-7,44))^\circ\text{C}}{(8,667 - 7,333)\text{min}}$$

$$V = \frac{-0,31^\circ\text{C}}{1,334\text{ h}} = -0,2324^\circ\text{C}/\text{h}$$

El signo negativo significa descenso (declive), aclarando que es velocidad de enfriamiento, tenemos:

$$V_{\text{form}} = 0,2324^\circ\text{C}/\text{h}$$

CAPÍTULO VII

7 PROGRAMA DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

7.1 Introducción

Se puede definir al mantenimiento como el control constante de los equipos e instalaciones, poniendo en marcha un conjunto de trabajos de inspección y reparación necesarios para garantizar el buen funcionamiento y estado de conservación de un sistema.

Para esto se ha realizado un programa de mantenimiento preventivo y correctivo, de acuerdo a las especificaciones técnicas, de trabajo y vida útil de cada elemento del equipo especificado por los fabricantes. También se ha tomado en cuenta las posibles fallas, causas y soluciones que se han presentado en el equipo durante todo el proceso de pruebas.

7.2 Manual de operaciones

Es muy importante que antes de operar la máquina se realice una lectura minuciosa del manual de operación. Si se opera según los manuales, la máquina no presentará problemas de ningún tipo.

Verificar que la máquina se encuentre libre de sustancias y artículos extraños para evitar alteraciones en su funcionamiento y fallas.

Asegurarse de que todos los sistemas y componentes se encuentren en su estado y posición óptima para comenzar a operar.

La máquina debe trabajar a temperatura ambiente y sin la presencia de factores externos tales como el contacto directo de la luz solar, corrientes bruscas de aire y polvo.

Inspeccionar que se cuente con una conexión de corriente eléctrica de 110V.

Debemos asegurarnos que el botón de control se encuentre en la posición de apagado. (Selector en la posición izquierda).

Verificar que la máquina se encuentre conectada a la corriente eléctrica.

Verificar que el tanque se encuentre con 2/3 de su capacidad, para asegurar que las bombas no funcionen en vacío.

Encender el equipo mediante el interruptor ubicado en el tablero de control y esperar un momento (2 minutos) a que todo el sistema se estabilice.

La salmuera debe llegar a la temperatura de trabajo para introducir los moldes, esta temperatura se la puede visualizar presionan el botón "SET" del controlador de temperatura por unos 3 segundos.

Alcanzada esa temperatura se procede a llenar los moldes con agua hasta las marcas en el molde, se los introduce en el tanque y se coloca el sensor de final de formación de hielo.

Por ningún motivo se debe apagar la máquina a la mitad del proceso, siempre se debe apagar cuando el proceso haya terminado.

En caso de falla pulsar el interruptor de emergencia en la parte inferior del tablero de control.

Una vez terminado el proceso de generación de hielo, el sistema se apagará automáticamente.

Se extraen los bloques de hielo de los moldes

Se desconecta la máquina y asegurarse de dejarla completamente limpia.

7.3 Guía de laboratorio

Debido a que el generador de hielo en bloque es un equipo didáctico destinado a ser usado en el laboratorio de energía para prácticas en las asignaturas de refrigeración y transferencia de calor.

Se elaboró las guías de laboratorio tomando en cuenta todos los parámetros de funcionamiento y resultados a obtener.

Los documentos correspondientes a cada guía se encuentran detallados en los anexos M: “Guía de laboratorio para enfriamiento de agua” y N: “Guía de laboratorio para formación de hielo”

7.4 Plan de mantenimiento

Aquí se presentan un conjunto de actividades programadas de antemano para mantener al equipo en buen estado, trabajando en condiciones óptimas y reducir la frecuencia y el impacto de las fallas.

Tabla 46. Jerarquía de las actividades de mantenimiento preventivo

Actividad de mantenimiento	ID
En cada puesta en marcha	I
Mensual	M
Anual	A

Fuente: Autores

7.4.1 *Mantenimiento preventivo.* Considerando que el generador de hielo en bloque será un equipo de uso intermitente se clasifican las actividades de mantenimiento preventivo de acuerdo a la siguiente jerarquía.

Tabla 47. Operaciones de mantenimiento preventivo

Ítem	Descripción de la actividad	Frecuencia		
		I	M	A
1	Verificar el correcto estado de apertura de las válvulas de paso recto ubicadas en la entrada y salida del sistema de recirculación	x		
2	Revistar la existencia de fugas de refrigerante en el circuito de generación de hielo.	x		
3	Revisar el estado de las conexiones eléctricas de cada sensor	x		
4	Limpieza correcta del tanque previa al llenado para evitar la presencia de impurezas que afecten los datos obtenidos en el transcurso de la experiencia.	x		

5	Revisar la fuente de alimentación para la tarjeta de arduino, los sensores y la fuente del cronometro	x		
6	Limpieza general del equipo.		x	
7	Revisar el estado de cada uno de los componentes del sistema de transferencia de calor.			X
8	Inspección detallada del tanque y la estructura.			X
9	Revisar el estado del aislamiento de la cañería.			X
10	Inspección detallada de todas las conexiones eléctricas.			X
11	Revisar el estado de la caja de control			X

Fuente: Autores

7.4.2 *Mantenimiento correctivo.* Implica actividades de reparación y sustitución de elementos deteriorados, que se realiza cuando aparece la falla.

Se ha visto conveniente crear una tabla en la que se detallen las posibles problemas que se pueden presentar durante la utilización del equipo, también se especifican las causas y las soluciones a esos problemas.

Tabla 48. Problemas operaciones, causas y soluciones

Problema	Causa	Solución
Maquina inoperable	No hay Corriente Eléctrica	Verifique el interruptor principal si se ha cortado la corriente
	Botoneras ON/OFF	Ajuste los contactos de las botoneras, evite que las conexiones Puedan hacer contacto, si esto no sirve reemplace el interruptor.
	Batería baja	Verifique que la batería que alimenta al arduino tenga carga, caso contrario deberá recargar para continuar con el proceso
Disminuye el volumen	Sensor de nivel	Revise la conexión del sensor de nivel en el arduino
	Válvula check	Desarme la válvula check que se encuentra en la descarga de la

de salmuera		Bomba de ingreso al tanque, revise si no está remordida, límpiela.
	Válvula de paso	La válvula de paso en la extracción puede estar descalibrada, ajústela a la posición marcada
Se apaga inesperadamente	Sensor de final de carrera	Resetee la tarjeta de arduino

Fuente: Autores

CAPÍTULO VII

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

El principio de funcionamiento del generador de hielo en bloques se basa en la transferencia de calor por convección. Todos los datos y fórmulas recopiladas en el marco teórico de esta tesis han sido la base fundamental para el diseño del equipo.

El generador de hielo en bloque tiene la capacidad de generar 10 kg, en dos bloques de 5 kg cada uno, en condiciones de trabajo similares a las máquinas de producción en masa. En las experiencias realizadas genera los 10 kg entre 9 y 10 horas \pm 30 minutos aproximadamente, lo cual está dentro de las recomendaciones de los fabricantes este tipo de equipos, para que el hielo tenga la resistencia suficiente para poder ser manipulado, almacenado y transportado.

Se tomaron datos de temperatura en el enfriamiento del agua para el cálculo de la velocidad de enfriamiento, se elaboraron las curvas de Temperatura vs tiempo en las que se puede observar el comportamiento del agua ante el descenso de temperatura, se puede notar que hay zonas muy definidas en este proceso.

Para el agua ablandada se determinó que la velocidad de enfriamiento desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente cero ($0,5^{\circ}\text{C}$ sugerido) se demora alrededor de 45:50 minutos y se denota dos zonas claramente definidas, en cada una de ellas se calculó la velocidad de enfriamiento, zona 1, enfriamiento rápido: $V_{\text{enf}} = 1,235^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y zona 2, enfriamiento lento: $V_{\text{enf}} = 0,14^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Para el agua normal se determinó que la velocidad de enfriamiento desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente cero ($0,5^{\circ}\text{C}$ sugerido) se demora alrededor de 31 minutos y se denota tres zonas claramente definidas, en cada una de ellas se calculó la velocidad de enfriamiento, zona 1, enfriamiento rápido: $V_{\text{enf}} = 1,529^{\circ}\text{C}/\text{min}$; zona 2, enfriamiento lento: $V_{\text{form}} = 0,5417^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y la zona 3, enfriamiento más lento: $V_{\text{form}} = 0,08^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Para el proceso de formación de hielo se obtuvieron datos de temperatura cada 5 minutos para el agua ablandada y cada 10 minutos para el agua normal. Para el agua ablandada el proceso duro 9h50 y para el agua normal duro 9 horas.

En los dos procesos se pueden notar claramente cuatro zonas, las cuales se las denominó de la siguiente manera: fase de enfriamiento, fase de cambio de estado, fase de sub enfriamiento y fase de equilibrio.

Las pruebas se las realizaron varias veces en las mismas condiciones de tipo de agua, temperatura de salmuera pero no se conseguían los mismos resultados, tras su respectivo análisis se determinó que afectaban factores externos como son las condiciones ambientales externas, la temperatura del agua y la composición ya no todos los días se tienen exactamente estos tres parámetros. Además de que en algunos días el sol impacta directamente en el equipo.

Un dato interesante hallado en las prácticas fue que al enfriar o congelar el agua se produce un fenómeno interesante, llega un punto en que el agua dentro del molde pasa de estar transparente a obscuro, se solidifica en un instante, al vaciar el molde, sacar el líquido se puede observar un formación tipo escarcha en la media del molde, mientras en los contornos se encuentra hielo más compacto.

8.2 Recomendaciones

Es importante llevar un control continuo de mantenimiento del equipo, sobre todo porque el equipo trabajó con químicos corrosivos, asegurando de esta forma su correcto funcionamiento y vida útil. Para ello se ha generado un plan de mantenimiento preventivo y correctivo, que se deberá consultar en caso de requerirse.

Se sugiere continuar con las investigaciones que surgen alrededor de la idea principal de este proyecto, y enfocarse en la obtención de datos de temperatura y obtención de la velocidad de formación de hielo en espesores determinados y tiempos exactos, de ser posible la determinación de la velocidad de formación de hielo en cada una de las direcciones, a través de software para la automatización del adquisición de los datos con intervalos de tiempo más pequeños.

Para la implementación de este tipo de generadores se los debe ubicar en lugares amplios donde el aire sea calmado, además de que no reciba el sol de forma directa.

Para asegurar el funcionamiento correcto del equipo y el equipo adjunto (equipo primario) es cambiar la bomba principal de bombeo del chiller, debido a que está dando problemas en su funcionamiento, se apaga después de unos 45 minutos, interrumpiendo el proceso de formación de hielo.

BIBLIOGRAFÍA

CENGEL., YUNUS A. 2011. Transferencia de calor y masa. s.l. : McGRAW-HILL INTERAMERICA EDITORES SA DE CV, 2011.

COFRICO. 2009. Sistemas de refrigeración y consumo energético en las fábricas de hielo. [En línea] COFRICO, 2009. <http://www.cofrico.com/newswp/blog/sistemas-de-refrigeracion-y-consumo-energetico-en-las-fabricas-de-hielo/>.

COSMOS. 2015. Información técnica y comercial de las máquinas para hacer hielo. [En línea] COSMOS, 2015. <http://www.cosmos.com.mx/d/tec/48lh.htm>.

DANFOSS. 2013. *Lista de precios 2013*. Colombia : Danfoss, 2013.

FAO. 1993. Equipo de fabricación de hielo. [En línea] FAO, 1993. <http://www.fao.org/docrep/003/t0713s/T0713S05.htm>.

HOLMAN, J.P. 1999. *Transferencia de Calor*. MEXICO : COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL S.A. DE C.V., 1999.

M.R., VALENZUELA. 2003. *Apuntes de Transferencia de Calor*. Riobamba : Facultad de Mecánica, 2003.

TAIWANTRADE. 2014. Planta de producción de hielo. [En línea] TAIWAN TURNKEY PROJECT ASSOCIATION, 2014. <http://turnkey.taiwantrade.com.tw/showpage.asp?subid=078&fdname=MISCELLANEOUS&pagename=Planta+de+produccion+de+hielo>.

VALENZUELA. 2003. *Apuntes de Transferencia de Calor*. Riobamba : Facultad de Mecánica, 2003.

WIKIPEDIA. 2014. WIKIPEDIA. [En línea] 2014. http://es.wikipedia.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_control.