



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PISTA DE  
HIELO A UN CHILLER PARA COMPARAR FIABILIDAD  
DE LOS REFRIGERANTES SECUNDARIOS  
PROPILENGLICOL Y CLORURO DE CALCIO”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN:**

**TIPO: PROYECTO TÉCNICO**

Presentado para obtener el grado académico de:

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTORES: JONNATHAN EDUARDO ROJAS LLIGUISUPA**

**JUAN CARLOS TIRADO TRUJILLO**

**DIRECTOR: Ing. TELMO JESUS MORENO ROMERO**

Riobamba – Ecuador

2019

**©2019, Jonnathan Eduardo Rojas Lliguisupa; y Juan Carlos Tirado Trujillo**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

**DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y CESION DE DERECHOS DE AUTOR DEL  
TRABAJO DE TITULACION A LA ESPOCH**

Nosotros, Jonnathan Eduardo Rojas Lliguisupa y Juan Carlos Tirado Trujillo, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Riobamba, 19 de julio de 2019



---

**Rojas Lliguisupa Jonnathan Eduardo**  
Cédula de Identidad: 060424324-6



---

**Tirado Trujillo Juan Carlos**  
Cédula de Identidad: 180310635-8

# CERTIFICACIÓN DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

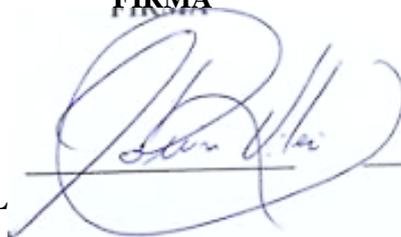
## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: PROYECTO TÉCNICO, **IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE PISTA DE HIELO A UN CHILLER PARA COMPARAR LA FIABILIDAD DE LOS REFRIGERANTES SECUNDARIOS PROPILENGLICOL Y CLORURO DE CALCIO**, realizado por los señores: **JONNATHAN EDUARDO ROJAS LLIGUISUPA y JUAN CARLOS TIRADO TRUJILLO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

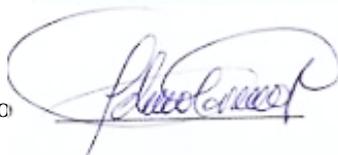
**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Edwin Fernando Viteri Núñez  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



Ing. Telmo Jesús Moreno Romero  
**DIRECTOR DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**



Ing. Otto Fernando Balseca Sampedro  
**MIEMBRO DE TRIBUNAL**



## **DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a la memoria del Ingeniero Paul Cabadiana Morocho quien con su apoyo, alegría y amistad fue la motivación para conseguir este título. Sabemos que estarías orgulloso, algún día nos volveremos a ver querido amigo.

**Jonnathan Rojas y Juan Tirado**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el cuerpo docente y administrativo de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

A mi madre Julia por el apoyo incondicional, a mi padre Cesar y a mi hermano Santiago. A todos mis amigos por estar siempre a mi lado.

**Jonnathan Eduardo Rojas**

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el cuerpo docente y administrativo de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

A mis padres Ramiro y Teresa, mi hermano Andrés, mi cuñada María y mi sobrina Paula, por ser el apoyo familiar necesario.

A mi esposa Cristina y su familia por la ayuda brindada, a mi hijo Dieguito por cambiar mi vida y los amigos que fueron parte de este logro.

**Juan Carlos Tirado**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>XVI</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. ALCANCE .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>3</b>
<b>1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITULO II</b>	
<b>2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. CONCEPTOS GENERALES.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.1. <i>Calor</i> .....</b>	<b>5</b>
2.1.1.1. <i>Calor sensible</i> .....	5
2.1.1.2. <i>Calor latente</i> .....	6
<b>2.1.2. <i>Transferencia de calor</i>.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.3. <i>Transferencia de calor por conducción</i> .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.4. <i>Transferencia de calor por convección</i> .....</b>	<b>9</b>
2.1.4.1. <i>Número de Nusselt</i> .....	10
2.1.4.2. <i>Número de Prandtl</i> .....	10
<b>2.1.5. <i>Transferencia de calor por radiación</i>.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.6. <i>Coefficiente global de transferencia de calor</i> .....</b>	<b>12</b>

2.1.7.	<i>Diferencia media logarítmica de temperatura</i>	14
2.2.	<b>REFRIGERACIÓN INDUSTRIAL</b>	15
2.2.1.	<i>Sistemas de refrigeración</i>	15
2.2.2.	<i>Aplicaciones de un sistema de refrigeración</i>	16
2.2.3.	<i>Aplicaciones de refrigerantes secundarios</i>	16
2.2.4.	<i>Ciclo de refrigeración</i>	16
2.2.5.	<i>Eficiencia de un proceso de refrigeración</i>	18
2.2.6.	<i>Equipo chiller</i>	18
2.3.	<b>REFRIGERANTES INDUSTRIALES</b>	20
2.3.1.	<i>Refrigerante</i>	20
2.3.2.	<i>Características de un refrigerante</i>	20
2.3.3.	<i>Designación de un refrigerante</i>	21
2.3.4.	<i>Clasificación de los refrigerantes</i>	21
2.3.5.	<i>Refrigerantes secundarios</i>	22
2.3.5.1.	<i>Propiedades físicas</i>	22
2.3.5.2.	<i>Protección contra la corrosión</i>	23
2.3.5.3.	<i>Cloruro de Calcio</i>	23
2.3.5.4.	<i>Propilenglicol</i>	24
2.4.	<b>PISTA DE HIELO</b>	25
2.4.1.	<i>Características generales de una pista de hielo</i>	25
2.4.2.	<i>Equipamiento de una pista de hielo</i>	25
2.4.2.1.	<i>Base de una pista de hielo</i>	25
2.4.2.2.	<i>Distribución de los colectores</i>	26
2.4.2.3.	<i>Climatización</i>	27
2.4.2.4.	<i>Deshumidificación</i>	27

### **CAPITULO III**

<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO: DISEÑO Y ADAPTACIÓN DEL PROTOTIPO DE PISTA DE HIELO.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO CHILLER.....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.1.</b>	<i>Caracterización del evaporador.....</i>	<b>29</b>
<b>3.1.2.</b>	<i>Tanque de la salmuera .....</i>	<b>29</b>
<b>3.1.3.</b>	<i>Bomba de recirculación de la salmuera .....</i>	<b>30</b>
<b>3.2.</b>	<b>EVALUACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE REFRIGERANTES SECUNDARIOS .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.1.</b>	<i>Evaluación del Propilenglicol como refrigerante secundario .....</i>	<b>31</b>
<b>3.2.2.</b>	<i>Evaluación del Cloruro de Calcio como refrigerante secundario .....</i>	<b>31</b>
<b>3.3.</b>	<b>DISEÑO DEL PROTOTIPO DE PISTA HIELO.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.1.</b>	<i>Dimensiones del prototipo .....</i>	<b>32</b>
<b>3.3.2.</b>	<i>Diseño de la base de la pista de hielo .....</i>	<b>32</b>
<b>3.3.3.</b>	<i>Capacidad frigorífica de la salmuera .....</i>	<b>33</b>
<b>3.3.4.</b>	<i>Cálculo de cargas frigoríficas .....</i>	<b>36</b>
<b>3.3.4.1.</b>	<i>Cálculo del calor por convección .....</i>	<b>36</b>
<b>3.3.4.2.</b>	<i>Cálculo del calor por Radiación.....</i>	<b>37</b>
<b>3.3.4.3.</b>	<i>Calor disponible para la formación del hielo .....</i>	<b>39</b>
<b>3.3.4.4.</b>	<i>Cálculo del espesor de la capa de hielo .....</i>	<b>39</b>
<b>3.3.5.</b>	<i>Dimensionamiento del serpentín .....</i>	<b>40</b>
<b>3.4.</b>	<b>IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE PISTA DE HIELO .....</b>	<b>45</b>
<b>3.4.1.</b>	<i>Adaptación de la base .....</i>	<b>46</b>
<b>3.4.2.</b>	<i>Montaje del serpentín .....</i>	<b>46</b>
<b>3.4.3.</b>	<i>Montaje de equipos de medición .....</i>	<b>47</b>
<b>3.4.4.</b>	<i>Implementación del sistema de adquisición de datos.....</i>	<b>48</b>
<b>CAPITULO IV</b>		
<b>4.</b>	<b>FASE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.</b>	<b>PRUEBA 1. SALMUERA CLORURO DE CALCIO AL 21%.....</b>	<b>51</b>

4.1.1.	<i>Tiempo de congelación del agua prueba 1</i> .....	53
4.1.2.	<i>Temperatura de la salmuera vs tiempo prueba 1</i> .....	54
4.2.	<b>PRUEBA 2. SALMUERA CLORURO DE CALCIO AL 15%</b> .....	55
4.2.1.	<i>Tiempo de congelación del agua prueba 2</i> .....	56
4.2.2.	<i>Temperatura de la salmuera vs tiempo prueba 2</i> .....	57
4.3.	<b>PRUEBA 3. SALMUERA PROPILENGLICOL AL 30%</b> .....	59
4.3.1.	<i>Tiempo de congelación del agua prueba 3</i> .....	60
4.3.2.	<i>Temperatura de la salmuera vs tiempo prueba 3</i> .....	61
4.4.	<b>PRUEBA 4. SALMUERA PROPILENGLICOL AL 21%</b> .....	63
4.4.1.	<i>Tiempo de congelación del agua prueba 4</i> .....	64
4.4.2.	<i>Temperatura de la salmuera vs tiempo prueba 4</i> .....	65
4.5.	<b>CONSUMO ENERGÉTICO</b> .....	66
4.5.1.	<i>Consumo energético prueba 1 Cloruro de Calcio 21%</i> .....	67
4.5.2.	<i>Consumo energético prueba 2 Cloruro de Calcio 15 %</i> .....	68
4.5.3.	<i>Consumo energético prueba 3 Propilenglicol 30%</i> .....	69
4.5.4.	<i>Consumo energético prueba 4 Propilenglicol 21%</i> .....	70
4.6.	<b>ANÁLISIS COMPARATIVO DE FIABILIDAD</b> .....	71
4.6.1.	<i>Análisis comparativo de temperatura del agua vs tiempo</i> .....	72
4.6.2.	<i>Análisis comparativo de consumo energético</i> .....	72
4.6.3.	<i>Análisis de factores adicionales</i> .....	74
4.6.4.	<i>Análisis comparativo de costos</i> .....	77
4.7.	<b>COSTOS DEL PROYECTO</b> .....	78
4.7.1.	<i>Costos directos</i> .....	78
4.7.2.	<i>Costos indirectos</i> .....	80
4.7.3.	<i>Costos totales</i> .....	80
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	81

**RECOMENDACIONES.....83**

**BIBLIOGRAFIA**

**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Características del refrigerante 134a .....	6
<b>Tabla 2-2.</b> Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente.....	9
<b>Tabla 3-2.</b> Propiedades físicas del etilenglicol y Propilenglicol .....	23
<b>Tabla 4-2.</b> Propiedades de la salmuera de Cloruro de Calcio puro .....	24
<b>Tabla 5-2.</b> Conductividad térmica de una solución acuosa de Propilenglicol .....	25
<b>Tabla 1-3.</b> Características intercambiador de calor.....	29
<b>Tabla 2-3.</b> Características de la bomba PLURIJETm 4/100-N.....	30
<b>Tabla 3-3.</b> Propiedades salmuera Propilenglicol al 21% .....	33
<b>Tabla 4-3.</b> Propiedades salmuera de Propilenglicol al 30% .....	34
<b>Tabla 5-3.</b> Propiedades salmuera de Cloruro de Calcio al 15% .....	35
<b>Tabla 6-3.</b> Propiedades salmuera de Cloruro de Calcio al 21% .....	36
<b>Tabla 7-3.</b> Dimensiones para el cálculo de calor por radiación .....	38
<b>Tabla 8-3.</b> Datos para cálculo de coeficiente convectivo.....	42
<b>Tabla 9-3.</b> Datos para cálculo de resistencias térmicas .....	43
<b>Tabla 1-4.</b> Resultados prueba experimental con Cloruro de Calcio al 21% .....	52
<b>Tabla 2-4.</b> Resultados prueba experimental con Cloruro de Calcio al 15% .....	56
<b>Tabla 3-4.</b> Resultados prueba experimental con Propilenglicol 30% .....	60
<b>Tabla 4-4.</b> Resultados prueba experimental con Propilenglicol al 21% .....	64
<b>Tabla 5-4.</b> Datos energéticos equipo chiller .....	66
<b>Tabla 6-4.</b> Caudal y altura promedio prueba 1 .....	68
<b>Tabla 7-4.</b> Caudal y altura promedio prueba 2 .....	69
<b>Tabla 8-4.</b> Caudal y altura promedio prueba 3 .....	70
<b>Tabla 9-4.</b> Caudal y altura promedio prueba 4 .....	71
<b>Tabla 10-4.</b> Costo de Cloruro de Calcio .....	77
<b>Tabla 11-4.</b> Costo de Propilenglicol .....	77
<b>Tabla 12-4.</b> Costos de materiales del prototipo: .....	78
<b>Tabla 13-4.</b> Materia prima.....	79
<b>Tabla 14-4.</b> Costos de construcción.....	79
<b>Tabla 15-4.</b> Costos de mantenimiento .....	79
<b>Tabla 16-4.</b> Costos directos totales .....	80
<b>Tabla 17-4.</b> Costos indirectos .....	80
<b>Tabla 18-4.</b> Costos totales .....	80

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-3.</b> Factor de ángulo por radiación entre paredes rectangulares $F_{ci}$ .....	38
<b>Gráfico 2-3</b> Temperaturas para cálculo de LMTD.....	44
<b>Gráfico 1-4.</b> Curva temperatura del agua vs tiempo para salmuera $\text{CaCl}_2$ 21% .....	53
<b>Gráfico 2-4.</b> Temperaturas de entrada y salida de la salmuera $\text{CaCl}_2$ 21% .....	54
<b>Gráfico 3-4.</b> Variación de $\Delta T$ vs tiempo salmuera $\text{CaCl}_2$ 21% .....	54
<b>Gráfico 4-4.</b> Curva temperatura del agua vs tiempo salmuera $\text{CaCl}_2$ 15%.....	57
<b>Gráfico 5-4.</b> Temperaturas de entrada y salida de la salmuera $\text{CaCl}_2$ 15% .....	57
<b>Gráfico 6-4.</b> Variación de $\Delta T$ vs tiempo salmuera $\text{CaCl}_2$ 15% .....	58
<b>Gráfico 7-4.</b> Curva temperatura del agua vs tiempo para salmuera $\text{CaCl}_2$ 30%.....	61
<b>Gráfico 8-4.</b> Temperaturas de entrada y salida de la salmuera Propilenglicol 30% .....	61
<b>Gráfico 9-4.</b> Variación de $\Delta T$ vs tiempo salmuera Propilenglicol 30% .....	62
<b>Gráfico 10-4.</b> Curva temperatura del agua vs tiempo para salmuera Propilenglicol 21% .....	65
<b>Gráfico 11-4.</b> Temperaturas de entrada y salida de la salmuera Propilenglicol 21% .....	65
<b>Gráfico 12-4.</b> Variación de $\Delta T$ vs tiempo salmuera Propilenglicol 21% .....	66
<b>Gráfico 13-4.</b> Comparación de la temperatura del agua con las diferentes salmueras .....	72
<b>Gráfico 14-4.</b> Comparación energía consumida salmueras Cloruro de Calcio.....	73
<b>Gráfico 15-4.</b> Comparación energía consumida salmueras Propilenglicol .....	73
<b>Gráfico 16-4.</b> Comparación consumo energético de las salmueras.....	74
<b>Gráfico 17-4.</b> Comparación de costos de mantenimiento y factores adicionales .....	76
<b>Gráfico 18-4.</b> Comparación costo inicial de funcionamiento.....	77

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2.</b> Formas sensible y latente de energía interna.....	7
<b>Figura 2-2.</b> (A) Conducción (B) Convección .....	8
<b>Figura 3-2.</b> Red de resistencias térmicas .....	13
<b>Figura 4-2.</b> LMTD para fluidos paralelos.....	14
<b>Figura 5-2.</b> LMTD para fluidos en contra corriente .....	14
<b>Figura 6-2.</b> LMTD para fluidos con cambio de fase.....	15
<b>Figura 7-2.</b> Ciclo de compresión de vapor .....	16
<b>Figura 8-2.</b> Ciclo invertido de Carnot – temperatura vs entropía.....	17
<b>Figura 9-2.</b> Diagrama presión – entalpía del ciclo teórico de refrigeración .....	17
<b>Figura 10-2.</b> Esquema de una maquina térmica ideal .....	18
<b>Figura 11-2.</b> Esquema general de un chiller .....	19
<b>Figura 12-2.</b> Proceso de refrigeración secundaria .....	19
<b>Figura 13-2.</b> HFC-134a Diagrama presión – entalpía (Unidades SI).....	21
<b>Figura 14-2.</b> Clasificación del grupo de seguridad de refrigerantes .....	22
<b>Figura 15-2.</b> Viscosidad de soluciones acuosas de Propilenglicol.....	24
<b>Figura 16-2.</b> Piso abierto de arena sin aislamiento .....	26
<b>Figura 17-2.</b> Colectores a lo largo de la pista de hielo.....	26
<b>Figura 18-2.</b> Sección transversal de una pista de hielo .....	27
<b>Figura 19-2.</b> Principio de condensación de vapor de agua .....	28
<b>Figura 20-2.</b> Sistema de humidificación secante .....	28
<b>Figura 1-3.</b> Esquema tanque de la salmuera .....	30
<b>Figura 2-3.</b> Bomba PREDOLLO PLURIJETm 4/100-N.....	30
<b>Figura 3-3.</b> Esquema de la base del prototipo de pista de hielo .....	33
<b>Figura 4-3.</b> Resistencias térmicas en la base del prototipo .....	41
<b>Figura 5-3.</b> Montaje de la base del prototipo de pista de hielo .....	46
<b>Figura 6-3.</b> Montaje de serpentín y arena en el prototipo .....	46
<b>Figura 7-3.</b> Termocuplas tipo K .....	47
<b>Figura 8-3.</b> Termopares a la entrada y salida del serpentín .....	47
<b>Figura 9-3.</b> Caudalímetro .....	48
<b>Figura 10-3.</b> Manómetro instalado a la salida de bomba .....	48
<b>Figura 11-3.</b> Tarjeta Dac NI cDAQ-9174.....	49
<b>Figura 12-3.</b> Instalación de termopares y caudalímetro a la DAC .....	49
<b>Figura 13-3.</b> Pantalla de visualización de datos.....	49
<b>Figura 14-3.</b> Programación tarjeta de adquisición de datos .....	50

<b>Figura 1-4.</b> Formación del hielo Cloruro de Calcio 21% .....	53
<b>Figura 2-4.</b> Formación del hielo Cloruro de Calcio 15% .....	58
<b>Figura 3-4.</b> Formación del hielo Propilenglicol 30% .....	62
<b>Figura 4-4.</b> Oxidación en el tanque de salmuera .....	75
<b>Figura 5-4.</b> Deterioro en sellos y empaques .....	75
<b>Figura 6-4.</b> Preparación salmuera de Propilenglicol .....	75
<b>Figura 7-4.</b> Preparación salmuera Cloruro de Calcio .....	76

## RESUMEN

Este proyecto técnico tiene el objetivo de implementar un prototipo de pista de hielo con el fin de comparar la fiabilidad de los refrigerantes secundarios Propilenglicol y Cloruro de Calcio a diferentes concentraciones. Para el diseño de la pista se parte de un área relativa de 0,5 metros cuadrados. Teniendo esta área de transferencia de calor se encontraron las cargas frigoríficas con las diferentes concentraciones tanto de Propilenglicol como de Cloruro de Calcio. El calor crítico, base de este diseño térmico se lo obtuvo con una concentración de Cloruro de Calcio al 21 por ciento. Para el diseño del serpentín se tomó en cuenta las resistencias térmicas que intervienen en el proceso de transferencia de calor, cada una de las resistencias térmicas representan a cada capa de material con el que está construido la pista de hielo. Basado en esto se encontró la longitud óptima del serpentín para formar una capa de hielo de 1 centímetro de espesor. Así también se instalaron dos termocuplas tipo K para las lecturas de temperatura tanto a la entrada como a la salida del serpentín de la pista de hielo con el fin de obtener la diferencia de temperatura y el calor absorbido en el proceso de generación de la capa de hielo. Después de realizar las pruebas se obtuvieron los resultados para todas las concentraciones de cada uno de los refrigerantes secundarios y de los tiempos de formación de la capa de hielo, así como también la variación de temperaturas de las salmueras. Finalmente se concluyó que la concentración de Propilenglicol al 21 por ciento presenta las características apropiadas para el proceso de formación de una pista de hielo frente a las demás concentraciones.

**Palabras Clave:** <TECNOLOGIA Y CIENCIAS DE LA INVESTIGACIÓN>, <PROPILENGLICOL>, <CLORURO DE CALCIO>, <FIABILIDAD>, <IMPLEMENTACIÓN>, <REFRIGERANTE SECUNDARIO>.



## SUMMARY

This technical project aims to implement a prototype ice rink in order to compare the reliability of secondary refrigerants. For the design of the track it is a relative area of 0.5 square meters. Having in this area of calorie transfer is the refrigeration loads with the different parts of both Propylene Glycol and Calcium Chloride. The critical heat, the basis of this thermal design, was obtained with a concentration of 21 percent calcium chloride. For the design of the coil, the thermal resistances involved in the heat transfer process were taken into account, each of the thermal resistances representing each layer of material with which the ice rink is constructed. Based on this, the optimum length of the coil was found to form an ice layer 1 centimeter thick. Two K-type thermocouples were also installed for the temperature readings both at the entrance and exit of the ice rink coil in order to obtain the difference in temperature and the heat absorbed in the process of generating the layer of ice. After carrying out the tests, the results were obtained for all the functions of each one of the refrigerants and the times of formation of the ice layer, as well as the variation of the brine temperatures. Finally, it was concluded that the concentration of propylene glycol at 21 percent presents the characteristics of the functions of the process of forming an ice rink in front of the others that is to be used. refrigeration

**Key words:** <TECHNOLOGY AND RESEARCH SCIENCES>, <PROPYLENEGLICOL>, <CALCIUM CHLORIDE>, <RELIABILITY>, <IMPLEMENTATION>, <REFRIGERANT SECONDARY>.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria necesita contar con sistemas eficientes de transferencia de calor en los que están involucrados sistemas de refrigeración directa, así como también sistemas de refrigeración secundaria cuando se trata de procesos en los que es necesario mantener bajas temperaturas. Según estudios los refrigerantes secundarios son de gran utilidad en distintos ámbitos como en la conservación de alimentos o en el plano del entretenimiento, como es la construcción de pistas artificiales de hielo.

En el presente proyecto se desarrolla la implementación de un prototipo de pista hielo para comparar la fiabilidad de dos refrigerantes secundarios como son Propilenglicol y Cloruro de Calcio. Para realizar el diseño del prototipo de pista de hielo se consideran los principios de la termodinámica, transferencia de calor y otros fundamentos de ingeniería, todos estos criterios están en concordancia con las recomendaciones de la *American Society Of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE*.

Para la etapa de diseño se analiza las características del equipo Chiller instalado en el Laboratorio de Energía de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, este equipo es el encargado de disminuir la temperatura de la mezcla (agua-refrigerante secundario) también llamada salmuera, mediante un ciclo de refrigeración por compresión. Una vez que la salmuera adquiere una baja temperatura se hace circular a través de un serpentín que será el encargado de extraer el calor del agua hasta lograr su cambio de fase formando una capa de hielo.

Finalizada la etapa de diseño se procede a la construcción del prototipo, para lo cual se utilizan materiales adecuados. Además, se realiza el mantenimiento del chiller, revisión de instalaciones eléctricas y señalética, así como la instalación de equipo de medición y control que servirán para la adquisición de datos durante la fase experimental. Una vez verificados y corregidos distintos problemas presentes en los equipos se procede a la implementación del prototipo al chiller tomando las normas de seguridad apropiadas para el caso.

Una vez implementado el prototipo se realiza la fase experimental, tomando como punto de partida la preparación de las distintas concentraciones tanto de la salmuera de Cloruro de Calcio como de Propilenglicol, determinando así los volúmenes necesarios para cada mezcla.

Se realiza la adquisición de datos enfocada en la toma de variables que permitan determinar consumos energéticos que influyen en el proceso de formación del hielo, esto con la finalidad de realizar una comparación cualitativa y cuantitativa entre los beneficios y desventajas de la utilización de estos refrigerantes secundarios en este tipo de sistemas.

## CAPITULO I

### 1. DIAGNOSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1. Antecedentes

Las tecnologías de transferencia de calor han avanzado en muchos campos diferentes en el último siglo, por lo que se ha implementado cambios relacionados con los dispositivos involucrados con los sistemas térmicos.

Todas estas actualizaciones han llevado a obtener sistemas más eficientes, sin embargo, aún existe un margen para mejorar el rendimiento de la transferencia de calor, uno de los factores más restrictivos para aumentar esta eficiencia es la baja conductividad térmica de los fluidos comúnmente empleados en aplicaciones industriales como la farmacéutica, la alimenticia, la del entretenimiento, etc. (Vallejo, et al., 2018, p. 152).

En los sistemas de refrigeración existe un gran consumo de energía que depende en gran parte del tipo de sistema de refrigeración que se emplee, por esta razón se analiza la utilización de distintos refrigerantes secundarios en equipos chiller, con la finalidad de presentar alternativas que permitan mejorar los sistemas existentes (Moreno, et al., 2018, p. 419).

Los sistemas que presentan características favorables pueden ser implementados en distintas aplicaciones como en la conservación de alimentos dentro de supermercados, en el procesamiento dentro de la industria láctea, en la fabricación de cosméticos, entre otros, teniendo en cuenta siempre factores como la capacidad de transferencia de calor, propiedades corrosivas, costos de mantenimiento y reposición, así como el impacto ambiental que puede tener al ocasionarse fugas en el sistema o al desechar los mismos luego de haber cumplido su ciclo de vida útil.

Se han realizado varios estudios de soluciones acuosas como refrigerantes secundarios alternativos, pero la selección de un anticongelante requiere del análisis de varios criterios dependiendo de la aplicación, ya que de acuerdo con la necesidad se requerirá ciertas propiedades (Guaman & Muñoz , 2017, p. 109).

A pesar de que históricamente los propietarios e ingenieros prestaban menos atención a la selección correcta de un refrigerante que a otros componentes internos (Calm, 2002, p. 706), ahora la selección se basa en costos, rendimiento, facilidad de adquisición local, preferencias de operación y confiabilidad, así como garantizar el cumplimiento el políticas ambientales.

Los procesos térmicos han sido de gran utilidad en ámbitos socioculturales como es el caso de las pistas de hielo las mismas que constan de unidades de refrigeración para la generación del hielo y unidades de calefacción para suministrar calor a distintas áreas del edificio, las cuales pueden

ser utilizadas en distintos aspectos como el deportivo en el caso de Hockey, y en el entretenimiento como el patinaje sobre hielo para aficionados (IIHF, 2017, p. 18).

## **1.2. Alcance**

Realizar el diseño de un prototipo de pista de hielo para su adaptación en el chiller del Laboratorio de Energía, determinando el número y diámetro de los tubos por donde circula el refrigerante secundario para su correcto funcionamiento. De forma paralela mediante los cálculos necesarios determinar el grado de concentración, caudal y velocidad con la que debe circular el refrigerante basados en estudios previos y los datos técnicos del chiller.

Determinar la altura de la capa de hielo que debe tener el prototipo en función de las concentraciones de los refrigerantes secundarios (Propilenglicol y Cloruro de Calcio). Determinar el material óptimo de las tuberías y accesorios, seleccionar los equipos electrónicos apropiados para la implementación del prototipo al chiller y analizar los beneficios de estos refrigerantes comparando su fiabilidad en este tipo de sistemas.

## **1.3. Justificación**

Las investigaciones locales de los anticongelantes Propilenglicol y Cloruro de Calcio son limitadas e insuficientes, de ahí parte la necesidad de realizar un análisis del comportamiento de cada uno de ellos, tomando en cuenta todas las variables que intervienen en el proceso de transferencia de calor, para comparar la eficiencia que alcanzan cuando se encuentran en las mismas condiciones de trabajo.

El equipo chiller que se encuentra en el Laboratorio de Energía de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo no tiene una aplicación definida. Por tanto, se considera necesario implementar un sistema que permita conocer cómo funciona el proceso de refrigeración industrial con enfoque a las necesidades de un prototipo de pista de hielo.

El estudio servirá en un futuro para la experimentación práctica dentro del Laboratorio, complementando la formación de profesionales dentro de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Los resultados obtenidos mediante la recolección de datos experimentales servirán de guía para la adecuada selección del anticongelante y para estudios posteriores que permitan una caracterización más completa en busca de mejorar sus propiedades físicas.

## **1.4. Objetivo general**

Implementar un prototipo de pista de hielo a un chiller para comparar fiabilidad de los refrigerantes secundarios Propilenglicol y Cloruro de Calcio.

## **1.5. Objetivos específicos**

- Diseñar y seleccionar los componentes del sistema de refrigeración de un prototipo de pista de hielo.

- Determinar el espesor y dimensiones óptimas de la capa de hielo en función de las concentraciones de los refrigerantes secundarios Propilenglicol y Cloruro de Calcio.
- Efectuar pruebas de funcionamiento del prototipo con los refrigerantes secundarios Propilenglicol y Cloruro de Calcio.
- Analizar el comportamiento de los refrigerantes secundarios Propilenglicol y Cloruro de Calcio durante la formación de hielo del prototipo de pista de hielo para comparar su fiabilidad en este proceso.

## CAPITULO II

### 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1. Conceptos generales

Para el diseño e implementación de un modelo de pista de hielo se debe conocer los principios de termodinámica, transferencia de calor, ciclos de refrigeración, selección de materiales, entre otros criterios ingenieriles, además de conocer las características necesarias en un refrigerante para su utilización y selección.

Estos principios deben ser considerados y estar acorde con las normas ASHRAE siglas pertenecientes a la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*.

Los principios de construcción deben garantizar la salud y seguridad de los ocupantes, así como poseer una estética apropiada para facilitar las futuras experimentaciones en el banco.

##### 2.1.1. Calor

El calor es una forma de energía que generalmente es creada por la transformación de otros tipos de energía como la mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química, entre otras, es una energía de tránsito ya que nunca se encuentra estática (Almendariz & Lara, 2014, p. 5). Esto se debe a la diferencia de energía existente de un sistema a otro, y está relacionada directamente con la energía interna ya que parte de esta está asociada con la energía cinética y se conoce como energía sensible o calor sensible, mientras que la energía interna asociada con la fase se la conoce como energía latente o calor latente (Çengel, 2007, pp. 6-7). La energía interna es comparada con la cantidad de calor que posee un cuerpo cuando se encuentra en condiciones estacionarias y no existe trabajo de flujo.

##### 2.1.1.1. Calor sensible

Es el calor necesario para elevar la temperatura de un fluido sin que se produzca cambios en su estructura (Guaman & Muñoz, 2017, p. 23), este calor se transmite por una diferencia de temperatura y es palpable a los sentidos, es decir se puede apreciar el incremento o disminución de la temperatura del sistema.

El calor sensible proviene de la energía interna del fluido que está ligado a la energía cinética del mismo, en otras palabras, se puede decir que la velocidad y la actividad de las moléculas son proporcionales a la temperatura (Çengel, 2007, p. 6), este calor se puede cuantificar con la siguiente expresión:

$$q_s = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Donde:

$q_s$ : Calor sensible [W]

$\dot{m}$ : Flujo másico de la sustancia [Kg/s]

$C_p$ : Calor específico a presión constante [J/kg. K]

$\Delta T$ : Diferencial de temperatura [K]

Esta relación es válida siempre y cuando no exista trabajo de flujo en el sistema, además la constante de proporcionalidad  $C_p$  que es el calor específico depende del tipo de sustancia y la presión y temperatura a la que se encuentre la misma, recordando que tampoco existe cambio de fase de la sustancia de trabajo.

En la siguiente tabla se puede observar algunas características de un refrigerante primario a diferentes temperaturas:

**Tabla 1-2:** Características del refrigerante 134a

Refrigerante 134a saturado. Tabla de temperatura

Temp., $T$ °C	Pres. sat., $P_{sat}$ kPa	Volumen específico, $m^3/kg$		Energía interna, $kJ/kg$			Entalpía, $kJ/kg$			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líqu. sat., $v_f$	Vapor sat., $v_g$	Líqu. sat., $u_f$	Evap., $u_{fg}$	Vapor sat., $u_g$	Líqu. sat., $h_f$	Evap., $h_{fg}$	Vapor sat., $h_g$	Líqu. sat., $s_f$	Evap., $s_{fg}$	Vapor sat., $s_g$
-40	51.25	0.0007054	0.36081	-0.036	207.40	207.37	0.000	225.86	225.86	0.00000	0.96866	0.96866
-38	56.86	0.0007083	0.32732	2.475	206.04	208.51	2.515	224.61	227.12	0.01072	0.95511	0.96584
-36	62.95	0.0007112	0.29751	4.992	204.67	209.66	5.037	223.35	228.39	0.02138	0.94176	0.96315
-34	69.56	0.0007142	0.27090	7.517	203.29	210.81	7.566	222.09	229.65	0.03199	0.92859	0.96058
-32	76.71	0.0007172	0.24711	10.05	201.91	211.96	10.10	220.81	230.91	0.04253	0.91560	0.95813
-30	84.43	0.0007203	0.22580	12.59	200.52	213.11	12.65	219.52	232.17	0.05301	0.90278	0.95579
-28	92.76	0.0007234	0.20666	15.13	199.12	214.25	15.20	218.22	233.43	0.06344	0.89012	0.95356
-26	101.73	0.0007265	0.18946	17.69	197.72	215.40	17.76	216.92	234.68	0.07382	0.87762	0.95144
-24	111.37	0.0007297	0.17395	20.25	196.30	216.55	20.33	215.59	235.92	0.08414	0.86527	0.94941
-22	121.72	0.0007329	0.15995	22.82	194.88	217.70	22.91	214.26	237.17	0.09441	0.85307	0.94748
-20	132.82	0.0007362	0.14729	25.39	193.45	218.84	25.49	212.91	238.41	0.10463	0.84101	0.94564
-18	144.69	0.0007396	0.13583	27.98	192.01	219.98	28.09	211.55	239.64	0.11481	0.82908	0.94389
-16	157.38	0.0007430	0.12542	30.57	190.56	221.13	30.69	210.18	240.87	0.12493	0.81729	0.94222
-14	170.93	0.0007464	0.11597	33.17	189.09	222.27	33.30	208.79	242.09	0.13501	0.80561	0.94063
-12	185.37	0.0007499	0.10736	35.78	187.62	223.40	35.92	207.38	243.30	0.14504	0.79406	0.93911
-10	200.74	0.0007535	0.099516	38.40	186.14	224.54	38.55	205.96	244.51	0.15504	0.78263	0.93766
-8	217.08	0.0007571	0.092352	41.03	184.64	225.67	41.19	204.52	245.72	0.16498	0.77130	0.93629
-6	234.44	0.0007608	0.085802	43.66	183.13	226.80	43.84	203.07	246.91	0.17489	0.76008	0.93497
-4	252.85	0.0007646	0.079804	46.31	181.61	227.92	46.50	201.60	248.10	0.18476	0.74896	0.93372
-2	272.36	0.0007684	0.074304	48.96	180.08	229.04	49.17	200.11	249.28	0.19459	0.73794	0.93253

Fuente: (Çengel & Boles, 2012, p. 976)

### 2.1.1.2. Calor latente

Es el calor capaz de producir un cambio de fase en un fluido, este puede ser de estado sólido a líquido o líquido a sólido y se conoce como calor latente de fusión el mismo que se encuentra en función la entalpía de fusión  $h_{if}$ , y de líquido a vapor o de vapor a líquido y se conoce como calor latente de evaporación que se encuentra en función de la entalpía de vaporización  $h_{fg}$ , esto queda determinado por las ecuaciones:

$$q_{lf} = \dot{m} \cdot h_{if} \quad (2)$$

$$q_{lv} = \dot{m} \cdot h_{fg} \quad (3)$$

Donde:

$q_{lf}$ : Calor latente de fusión [W]

$q_{lv}$ : Calor latente de evaporación [W]

$\dot{m}$ : Flujo másico de la sustancia [Kg/s]

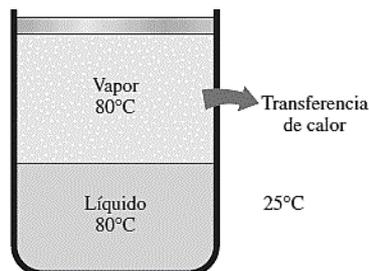
$h_{if}$ : Entalpía de fusión [J/Kg]

$h_{fg}$ : Entalpía de vaporización [J/Kg]

### 2.1.2. *Transferencia de calor*

La termodinámica se encarga del estudio de la transferencia de calor existe cuando un sistema pasa de un estado de equilibrio a otro, pero no toma en cuenta la rapidez con que este fenómeno se va a producir, el estudio de cuánto durará ese proceso constituye el tema de la ciencia de transferencia de calor, (Çengel, 2007, p. 17). El objetivo es relacionar la termodinámica con la transferencia de calor, así como los mecanismos básicos de transferencia de calor enfocados siempre en la solución de distintos problemas que se pueden presentar tanto en la vida cotidiana de las personas como en la industria.

La transferencia de calor es la ciencia encargada de predecir el intercambio de energía que se puede dar entre distintos materiales, utilizando los principios primero y segundo de la termodinámica, al proporcionar leyes experimentales adicionales que son usadas para establecer la rapidez de la transferencia de energía (Holman, 1998, p. 1). Este intercambio de energía es producido por la diferencia de temperatura, la energía se transmite desde una región de temperatura más alta a una región de baja temperatura por uno o más medios que pueden ser conducción, radiación y convección a través de intercambiadores de calor, calderas hornos, radiadores, o cualquier otra máquina térmica.



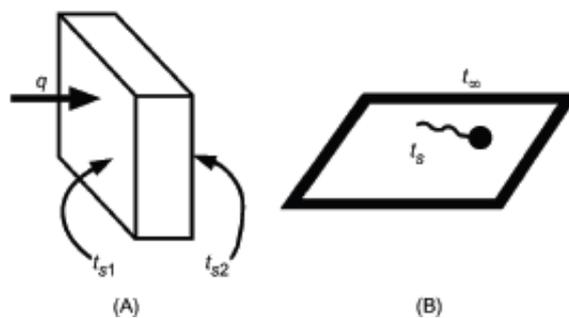
**Figura 1-2.** Formas sensible y latente de energía interna

Fuente: (Çengel, 2007, p. 9)

Los equipos que se diseñan para efectuar la transferencia de calor están sobre la base de la capacidad nominal y dimensionamiento (Çengel, 2007, p. 4), siempre tomando en cuenta los requerimientos del sistema al cuál se le busca una la solución, sin dejar de lado las consideraciones de eficiencia energética, así como el impacto ambiental que se pueda generar durante el proceso.

### 2.1.3. *Transferencia de calor por conducción*

La transferencia de calor por conducción se lleva a cabo por la interacción de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas como resultado de las interacciones de esas partículas, la conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases, aunque en estos dos últimos se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio (Çengel, 2007, p. 18). El calor fluye de las partes calientes a las más frías en un flujo unidireccional, como en el caso de una pared en la cual existe una diferencia de temperaturas a un lado y al otro de la misma siendo la conducción la única forma en la que se puede transmitir energía térmica a través de un sólido, teniendo una relación proporcional entre el calor transmitido y la diferencia de temperatura existente representado por:



**Figura 2-2.** (A) Conducción (B) Convección

Fuente: (ASHRAE, 2017, p. 4.1)

$$q \propto \frac{(t_{s1} - t_{s2})A_c}{L} \quad (4)$$

Donde  $\alpha$  significa proporcional,  $A_c$  el área transversal y  $L$  el espesor de la pared, por su parte el material a través del cual se está efectuando la transferencia de calor posee una propiedad llamada conductividad térmica  $k$ , entonces:

$$q = k \frac{(t_{s1} - t_{s2})A_c}{L} = \frac{(t_{s1} - t_{s2})}{L/(kA_c)} \quad (5)$$

Donde:

$q$ : Calor transferido [W]

$k$ : Coeficiente de conductividad térmica [W/ (m K)]

$A_c$ : Área transversal [m<sup>2</sup>]

$t_{s1}$ : Temperatura mayor [K]

$t_{s2}$ : Temperatura menor [K]

La diferencia  $L/(kA_c)$  se considera la resistencia de conducción, la misma que es análoga a la resistencia que se presenta en un conductor eléctrico, además las conductividades térmicas de algunos materiales se pueden encontrar en abanicos como los de la siguiente tabla:

**Tabla 2-2.** Conductividades térmicas de algunos materiales a temperatura ambiente

Material	$k$ , W/m · °C
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

\*Multiplíquese por 0.5778 para convertir a Btu/h · ft · °F.

Fuente: (Çengel, 2007, p. 20)

#### 2.1.4. *Transferencia de calor por convección*

Es el proceso mediante el cual se transporta energía térmica de una región de alta temperatura a una de menor temperatura entre un medio sólido y un fluido que están en contacto directo, esta puede ser natural o forzada (Almendariz & Lara, 2014, p. 32), en la Figura 2(B) tenemos un ejemplo en el que la tasa de transferencia de calor se puede cuantificar mediante la Ley de Newton para enfriamiento de manera que el calor transmitido es igual a:

$$q = h_c A_s (t_s - t_\infty) = \frac{(t_s - t_\infty)}{1/(h_c A_s)} \quad (6)$$

Donde:

$h_c$ : Coeficiente de transferencia de calor [W/m<sup>2</sup> · K]

$A_s$ : Área de contacto con el fluido. [m<sup>2</sup>]

$t_s$ : Temperatura de la superficie sólida [K]

$t_\infty$ : Temperatura ambiente [K]

La diferencia  $1/(h_c A_s)$  es la resistencia por conducción y el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_c$  representa una relación entre el calor transferido por unidad de área superficial por unidad de diferencia de temperatura, pero este coeficiente varía de un lugar a otro a lo largo de una tubería y para hacer una estimación aproximada se puede promediar coeficientes locales (Çengel, 2007, p. 358), además que su valor depende de otros coeficientes adimensionales como el número de Nusselt, Reynolds, Prandtl, Grashof.

#### 2.1.4.1. Número de Nusselt

Es un número adimensional que se concibe como el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección (Çengel, 2007, p. 358) y mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción (Peñaloza & Urgilés, 2009, p. 13), y está definido por:

$$Nu = \frac{h \cdot Lc}{k} \quad (7)$$

Donde:

$h$ : Coeficiente convectivo de transferencia de calor [W/m<sup>2</sup> K]

$Lc$ : Longitud característica [m]

$k$ : Coeficiente de conductividad térmica [W/ (m K)]

Las correlaciones del coeficiente de calor se derivan matemáticamente de los fundamentos y se obtiene a partir de correlaciones experimentales, y en su mayoría están en función de otros factores como el número de Reynolds, la geometría del sistema o el número de Prandtl.

#### 2.1.4.2. Número de Prandtl

Es la relación del componente cortante de la difusividad para el momento lineal y la difusividad de calor, y correlaciona físicamente el espesor relativo de la capa hidrodinámica con el de la capa límite térmico (Balseca, 2016, p. 9), un número adimensional que está definido por la expresión:

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k} \quad (8)$$

Donde:

$Cp$ : Calor específico [J/Kg K]

$\mu$ : Viscosidad dinámica [Kg/m s]

$k$ : Coeficiente de conductividad térmica [W/ (m K)]

El número de Prandtl varia de un fluido a otro dependiendo de la viscosidad del mismo, valores altos nos indican que los fluidos son muy viscosos y por lo tanto la difusión de calor será lenta comparado con la velocidad.

### 2.1.5. *Transferencia de calor por radiación*

Es un medio de transferencia de calor producido por la materia en una superficie cuando su temperatura está por encima del cero absoluto, la radiación está en forma de fotones de frecuencia variable (ASHRAE, 2017, p. 4.2) los cuales se expanden en diferentes direcciones sin la necesidad de un medio para ser transportados como ocurría en la conducción y en la convección, depende de la diferencia de temperatura, el material y la geometría de los medios entre los cuales se está produciendo la transferencia de calor.

La superficie que tiene la capacidad de absorber la radiación se denomina superficie negra y está dada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$q_{emit} = A_s \cdot W_b \quad (9)$$

Donde:

$q_{emit}$ : Calor emitido de una superficie negra calor transferido [W]

$A_s$ : Área de la superficie radiante [m<sup>2</sup>]

$W_b$ : Potencial de emisividad de un cuerpo negro [W/m<sup>2</sup>]

El potencial de emisividad  $W_b$  se encuentra relacionado con la constante de Stefan –Boltzmann y viene dado por:

$$W_b = \sigma \cdot T_s \quad (10)$$

Donde:

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzmann [5,67 x10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup>]

$T_s$ : Temperatura absoluta de la superficie [K]

La potencia emisiva  $W$  es menor a la de un cuerpo negro ideal  $W_b$ , este decrecimiento viene representado por la emisividad  $\varepsilon$  cuyos valores están entre 0 y 1, de ahí que:

$$W = \varepsilon \cdot W_b \quad (11)$$

Por lo tanto, el calor emitido a través de una superficie dada a una temperatura específica quedara expresado por:

$$q_{emit} = \varepsilon \sigma A_s \cdot T_s^4 \quad (12)$$

La capacidad de absorber calor producto de la radiación viene representada por la absorptividad  $\alpha$ , aunque la Ley de Kirchhoff de la radiación afirma que la emisividad y absorptividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda dadas son iguales (Çengel, 2007, p. 28), el calor absorbido por una superficie rodeada por otra a una cierta temperatura queda expresado por:

$$q_{abs} = \alpha \sigma A_s \cdot T_{surr}^4 \quad (13)$$

El calor neto transmitido entre dos superficies a través de radiación depende además de factores como la orientación, las dimensiones y los tamaños relativos, es así que la razón de transferencia de calor por radiación producida a un área  $A_s$  rodeada completamente por otro cuerpo emisor es igual a la diferencia del calor emitido y el calor absorbido y expresado por:

$$q_{net} = \varepsilon \sigma A_s \cdot T_s^4 - \alpha \sigma A_s \cdot T_{surr}^4 \quad (14)$$

Considerando la ley de Kirchhoff de la radiación obtenemos la expresión:

$$q_{net} = \varepsilon \sigma A_s \cdot (T_s^4 - T_{surr}^4) = \frac{W_{bs} - W_{s,surr}}{1/(\varepsilon A_s)} \quad (15)$$

La diferencia  $1/(\varepsilon \cdot A_s)$  es la resistencia por radiación y es análoga una resistencia eléctrica cuando se analiza solamente la transferencia de calor por radiación.

### **2.1.6. Coeficiente global de transferencia de calor**

El cálculo del coeficiente de transferencia de calor puede ser largo en procesos de refrigeración, este depende de las condiciones en las que se encuentre el flujo de fluido, cuando el calor es conducido entre dos fluidos mediante una placa sólida el coeficiente global de transferencia de calor está en relación inversa a las resistencias térmicas presentes (Hundy, et al., 2016, p. 13) de la siguiente manera:

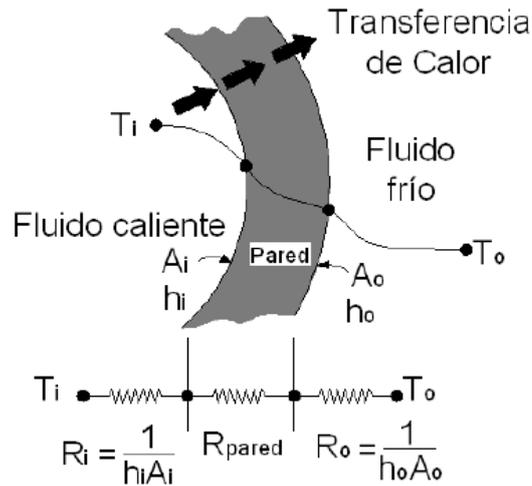
$$U = \frac{1}{Rt} \quad (16)$$

Donde:

U: Coeficiente global de transferencia de calor [W/h m<sup>2</sup> °C]

Rt: Resistencias térmicas totales [k m<sup>2</sup>/W]

La forma funcional de U puede derivarse para cualquier geometría mediante el análisis del sistema de interés y las condiciones bajo las cuales se encuentran las resistencias a la transferencia de calor del fluido.



**Figura 3-2.** Red de resistencias térmicas

**Fuente:** (Peñaloza & Urgilés, 2009, p. 44)

En primer lugar el calor se transfiere de un fluido a la pared por convección, a lo largo de la pared por conducción y finalmente de la pared hacia el fluido externo por convección (Peñaloza & Urgilés, 2009, p. 44), presentando cada una de estas etapas una resistencia térmica las cuales se pueden considerar análogas a las resistencias eléctricas y se suman para obtener la resistencia total de tal modo que.

$$R_t = R_i + R_{pared} + R_o \quad (17)$$

Donde:

$R_i$ : Resistencia por convección interior [ $k \text{ m}^2/\text{W}$ ]

$R_{pared}$ : Resistencia por conducción [ $k \text{ m}^2/\text{W}$ ]

$R_o$ : Resistencia por convección exterior [ $k \text{ m}^2/\text{W}$ ]

En ocasiones resulta conveniente expresar la transferencia de calor de un medio de una manera análoga a la Ley de enfriamiento de Newton (Çengel, 2007, p. 136), obteniendo de esta manera:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (18)$$

Donde:

$\Delta T$ : La diferencia de temperaturas entre el fluido frío y caliente

$A$ : Área de contacto [ $\text{m}^2$ ]

### 2.1.7. Diferencia media logarítmica de temperatura

Conocido como el método LMTD por sus siglas en inglés (*Log Mean Temperature Difference*), es un método para la selección de un intercambiador de calor con un tamaño que logre un cambio de temperatura específica (Peñaloza & Urgilés, 2009, p. 50), los valores que pueda tener están relacionados directamente con la estructura que tenga el intercambiador y las condiciones de uso siendo este igual a:

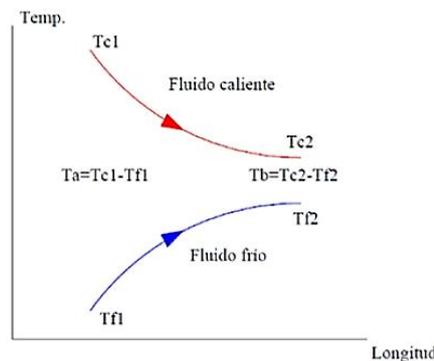
$$LMTD = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)} \quad (19)$$

Donde:

LMTD: Diferencia media logarítmica de temperatura [K]

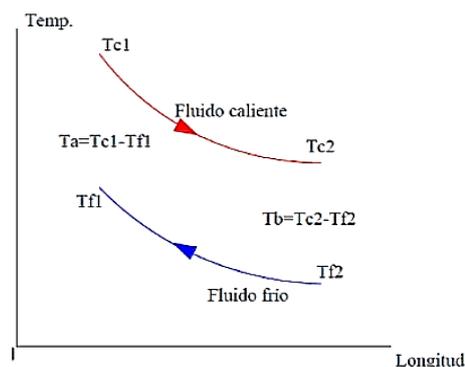
$\Delta T_a$ ,  $\Delta T_b$ : Diferencia de temperatura entre los fluidos [K]

Esta expresión es válida para todo tipo de intercambiadores de calor sin importar la configuración que tenga el mismo. En algunos casos se emplea un factor de corrección F, como por ejemplo en los intercambiadores de coraza y tubos, las diferencias de temperatura  $\Delta T_a$  y  $\Delta T_b$  pueden ser mejor entendidas mediante las siguientes figuras:



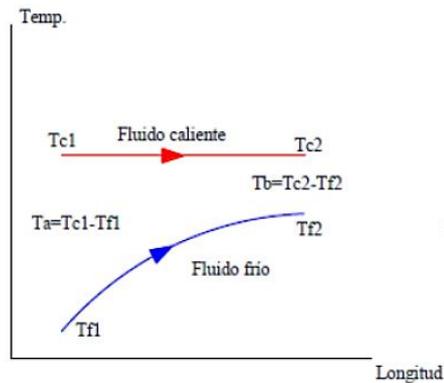
**Figura 4-2.** LMTD para fluidos paralelos

Fuente: (Almendariz & Lara, 2014, p. 36)



**Figura 5-2.** LMTD para fluidos en contra corriente

Fuente: (Almendariz & Lara, 2014, p. 37)



**Figura 6-2.** LMTD para fluidos con cambio de fase

**Fuente:** (Almendariz & Lara, 2014, p. 37)

La cantidad de calor que se transfiere aplicando el método del LMTD es determinado por el coeficiente global de transferencia de calor, el área, el factor de corrección que para fluidos con cambio de fase es igual a 1 y la diferencia media logarítmica de temperatura.

$$Q = U \cdot A \cdot F \cdot LMTD \quad (20)$$

Donde:

$U$ : Coeficiente global de transferencia de calor [W/h m<sup>2</sup>°C]

$F$ : Factor de corrección

$LMTD$ : Diferencia media logarítmica de temperatura [K]

$A$ : Área de contacto [m<sup>2</sup>]

## 2.2. Refrigeración Industrial

### 2.2.1. Sistemas de refrigeración

La refrigeración consiste en proceso de enfriamiento, de extracción de calor de un sistema para ser descargada a una temperatura más alta, esos sistemas de refrigeración tienen un amplio campo de utilización como el enfriamiento de superficies, congelación de productos, aire acondicionado, bombas de calor, entre otros muy utilizados e indispensable en la industria.

La extracción de calor de un lugar a otro se realiza mediante un ciclo cerrado, estos sistemas suelen estar en condiciones variables dependiendo del tiempo de funcionamiento que van a tener los mismos durante el año, las condiciones ambientales presentes en la zona donde se encuentra la instalación, las posibles variaciones e incrementos en las cargas frigoríficas, los diferentes tipos de refrigerantes que se puedan utilizar, así como el propósito para el cual fue diseñado el sistema.

### 2.2.2. Aplicaciones de un sistema de refrigeración

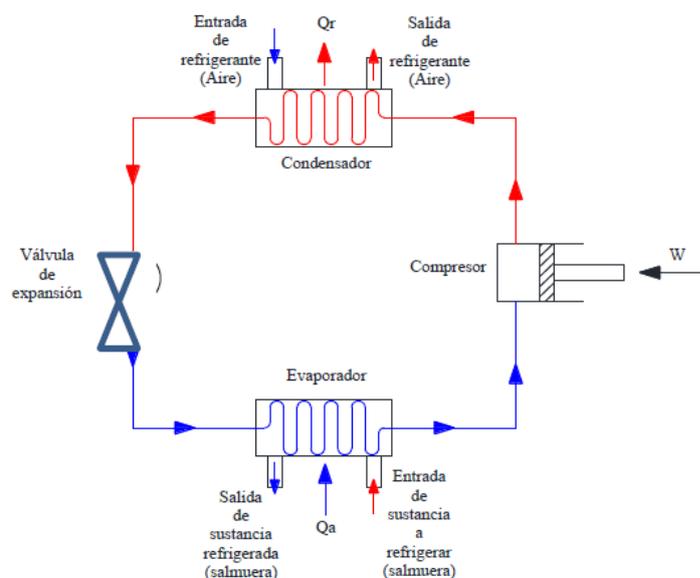
Los sistemas de refrigeración son muy utilizados en todo tipo de industria, entre las principales aplicaciones de los sistemas de refrigeración se encuentran la separación de gases y líquidos en la industria petrolera, sistemas de subenfriamiento, sobrecalentamiento, acondicionamiento de aire, acondicionamiento de tuberías que transportan gas, líquido o fluidos en cambio de fase (ASHRAE, 2018, p. 1.1).

### 2.2.3. Aplicaciones de refrigerantes secundarios

Los refrigerantes secundarios son utilizados en la industria alimenticia, como por ejemplo en enfriamiento del malto utilizado para la producción de cerveza debido a su baja toxicidad, también son utilizados para la generación de pistas artificiales de hielo o en sistemas de aire acondicionado.

### 2.2.4. Ciclo de refrigeración

Un ciclo de refrigeración puede estar constituido de varias formas, pero en instalaciones pequeñas se utiliza el sistema de compresión de vapor (Almendariz & Lara, 2014, p. 10), el ciclo básico de refrigeración consta de cuatro elementos principales, un evaporador, un compresor, una válvula de expansión y un condensador, componentes que forman un circuito por el cual circula constantemente un fluido refrigerante, el mismo que durante un período sufre dos cambios de fase, el primero de líquido a vapor, siendo este vapor el que se comprime y el segundo de vapor a líquido, ocurriendo todo esto en un ciclo cerrado como el que se muestra en la Figura 7-2.

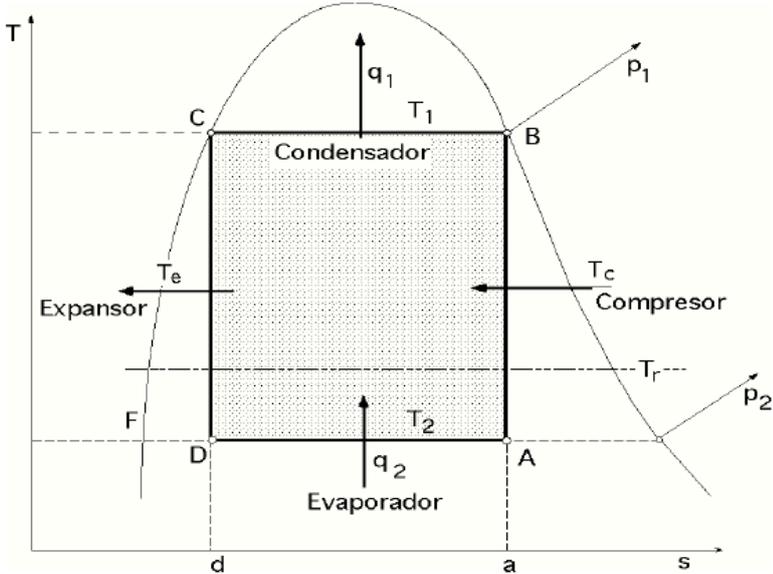


**Figura 7-2.** Ciclo de compresión de vapor

Fuente: (Almendariz & Lara, 2014, p. 10)

El ciclo de refrigeración es referido en ocasiones como el ciclo de Carnot invertido, en este ciclo se pueden observar dos procesos isotérmicos tanto en el evaporador como en el condensador

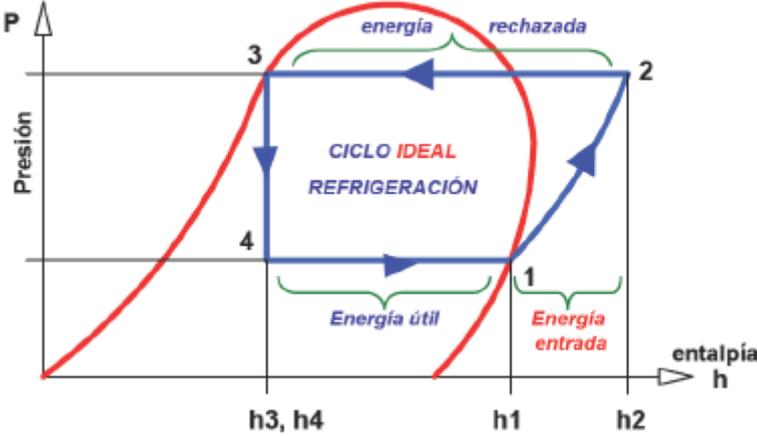
debido a que ahí ocurren los cambios de fase del refrigerante, y dos procesos isoentrópicos tanto en el compresor como en la válvula de expansión, esto se puede representar con la ayuda de un diagrama T-S como en de la Figura 8-2.



**Figura 8-2.** Ciclo invertido de Carnot – temperatura vs entropía

Fuente: (Almendariz & Lara, 2014, p. 10)

El estudio de las propiedades de un refrigerante en el interior del ciclo es importante debido a que durante el proceso existe cambio de fase del fluido, para esto es utilizado el diagrama presión – entalpía o diagrama P-h que además sirve de guía para encontrar las condiciones óptimas de funcionamiento.



**Figura 9-2.** Diagrama presión – entalpía del ciclo teórico de refrigeración

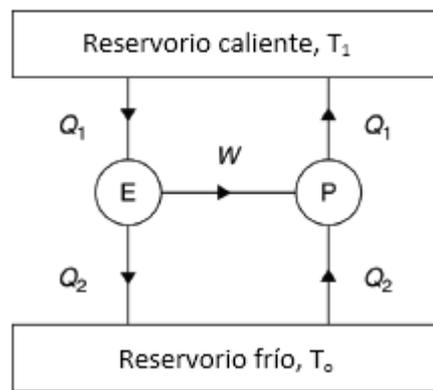
Fuente: (Buenaño & Esparza, 2010, p. 6)

### 2.2.5. Eficiencia de un proceso de refrigeración

En un ciclo de refrigeración se introduce una cantidad de energía o trabajo que va a permitir la extracción de una determinada cantidad de calor del sistema que se desea enfriar, estos dos parámetros se encuentran en relación proporcional directa y se conoce como coeficiente de rendimiento COP por sus siglas *Coefficient of performance* (Standford, 2012, p. 5).

Si consideramos un proceso de refrigeración completamente reversible podríamos decir que el calor extraído de un reservorio caliente es capaz de generar trabajo suficiente en una bomba de calor para que esta pueda extraer nuevamente dicho calor del reservorio frío y lo regrese en igual cantidad al primer reservorio, determinando de esta manera una relación directa entre el calor  $Q$  y el trabajo  $W$  sin existir pérdidas ni trabajo externo.

En la figura 10-2 se puede observar una relación directa entre el calor  $Q$  y el trabajo  $W$  sin existir pérdidas ni trabajo externo.



**Figura 10-2.** Esquema de una máquina térmica ideal

Fuente: Autores

Kelvin (1824 – 1907) concluyó que una escala de temperatura absoluta puede ser definida en términos de la eficiencia de una máquina térmica (Hundy, et al., 2016, p. 2), obteniendo una relación entre estas igual a:

$$W = \frac{Q_2(T_1 - T_0)}{T_0} \quad (21)$$

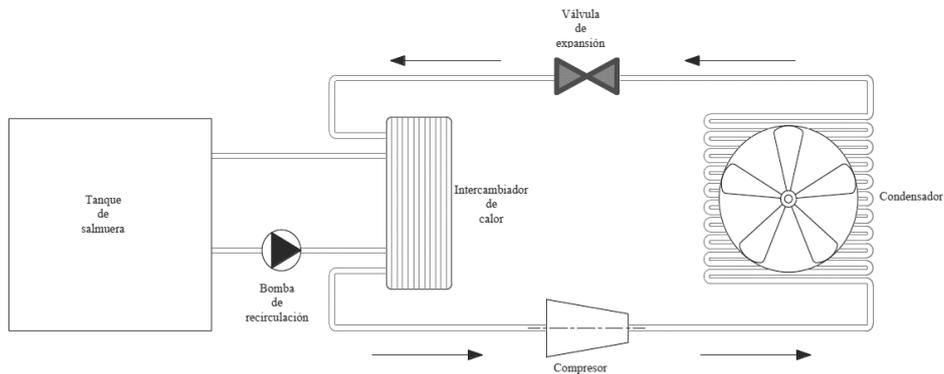
El COP o *Coefficient of performance* está definido por la relación entre el calor extraído y el trabajo ingresado al sistema obteniendo:

$$COP = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_0}{(T_1 - T_0)} \quad (22)$$

### 2.2.6. Equipo chiller

Un chiller es un equipo enfriador de líquidos, generalmente agua, que funciona mediante un ciclo de refrigeración por compresión de vapor, en el cual se encuentra el refrigerante primario en

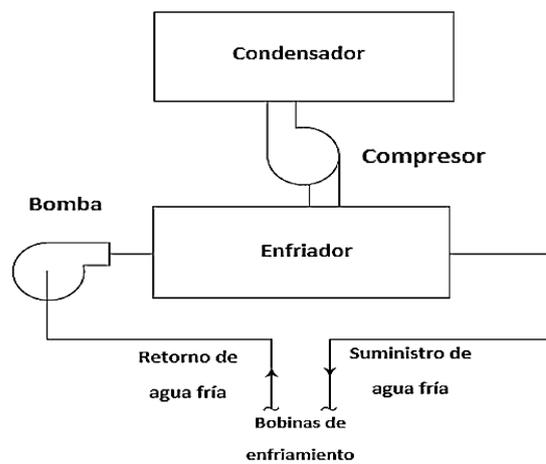
constante recirculación, este es el encargado de reducir la temperatura de un fluido secundario o refrigerante secundario a través del evaporador, (Standford, 2012, p. 15), en la figura 11-2 se puede ver un equipo chiller que proporciona agua fría a través de un sistema simple de bombeo.



**Figura 11-2.** Esquema general de un chiller

**Fuente:** (Almendariz & Lara, 2014, p. 5)

Para instalaciones pequeñas estos equipos son recomendados debido a su bajo costo inicial pero se debe tomar en cuenta que si la carga frigorífica se reduce por debajo del 30% la eficiencia del sistema baja radicalmente (Standford, 2012, p. 31), estos equipos son muy utilizados en instalaciones en las que no se desea que el refrigerante este en contacto directo con el producto que se desea refrigerar, además presenta facilidades de mantenimiento, y permite un control de temperatura preciso, en la figura 12-2 se puede observar un esquema de refrigeración secundaria.



**Figura 12-2.** Proceso de refrigeración secundaria

**Fuente:** Autores

## **2.3. Refrigerantes industriales**

### **2.3.1. Refrigerante**

Un refrigerante se lo puede entender como una sustancia química que absorbe el calor generado por otro cuerpo reduciendo su temperatura. El agua ya sea en estado líquido o sólido ha sido utilizada como refrigerante natural desde la prehistoria, ya en el siglo 19 se hizo más frecuente el uso de otros fluidos a modo de refrigerantes como el amoníaco o cloruro de metilo.

En la actualidad, los refrigerantes que se emplean a nivel industrial deben contar con ciertas propiedades que garanticen su estabilidad y seguridad durante su utilización. En general se trata de sustancias que no son inflamables ni explosivas, y que además no corroen los materiales con los que entran en contacto (Pérez & Gardey, 2014, p.1).

### **2.3.2. Características de un refrigerante**

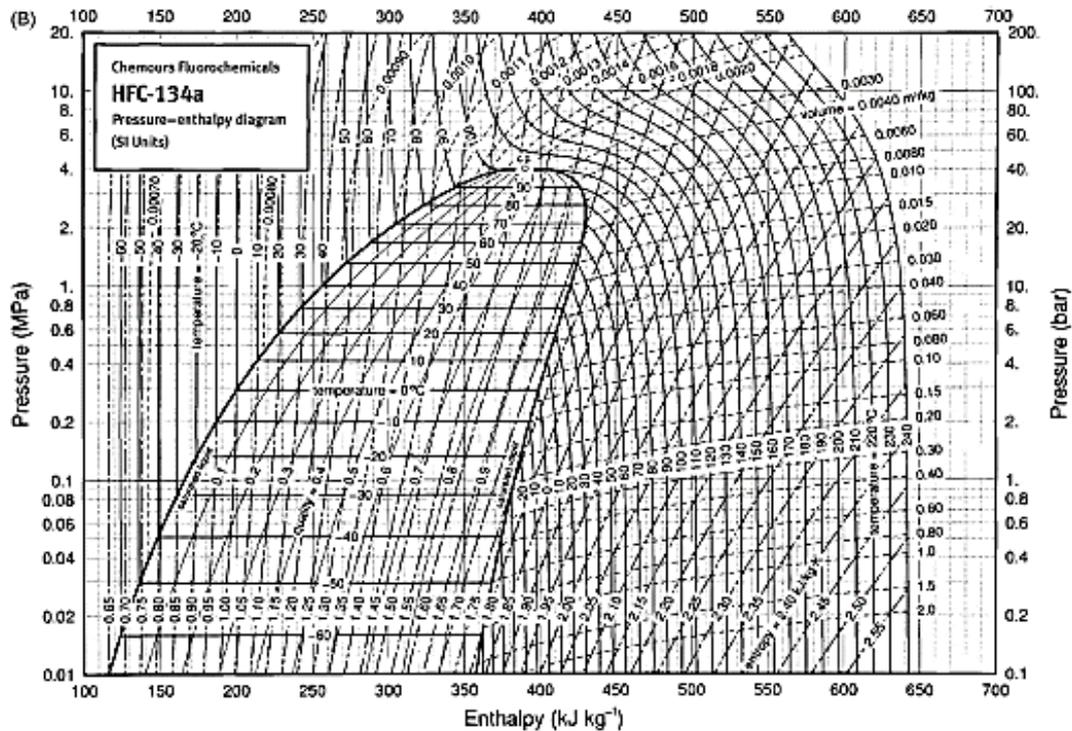
Existen un gran número de características que debe poseer un refrigerante para que pueda ser seleccionado, las características que prevalezcan serán elegidas por el criterio del diseñador del sistema y de otros factores como disponibilidad comercial y costos, de acuerdo con Fellows (2017, p. 847), los refrigerantes utilizados en los ciclos de compresión de vapor deben tener las siguientes cualidades:

- Un punto de ebullición bajo y una temperatura crítica alta, el vapor refrigerante no puede licuarse a temperaturas superiores a la temperatura crítica
- Un alto calor latente de vaporización para reducir el volumen de refrigerante requerido
- Un vapor denso para reducir la presión requerida en el compresor, y por lo tanto reducir el tamaño y costo del compresor.
- Baja toxicidad y no inflamable
- Químicamente estable y no perjudicial para el medio ambiente
- No corrosivo y con poca miscibilidad con aceite en el compresor.

Las propiedades térmicas de los refrigerantes son un factor muy importante, estas se describen en base a la presión en la que están trabajando, así como tablas de entalpía suministradas por el fabricante, en la figura 13-2 se puede observar los componentes principales de un gráfico de entalpía de presión, con presión trazado en una escala logarítmica.

El área a la izquierda de la curva de campana representa refrigerante líquido subenfriado, el área a la derecha de la curva representa vapor sobrecalentado por encima de la temperatura de saturación del vapor a la presión correspondiente, dentro de la curva, las líneas de fracción de sequedad muestran la proporción de líquido y vapor en el refrigerante, las líneas de presión constante son las líneas horizontales en el gráfico y las líneas de temperatura constante son

verticales en la región líquida del gráfico, horizontales bajo la curva de la campana y curvada hacia abajo en la región de vapor



**Figura 13-2.** HFC-134a Diagrama presión – entalpía (Unidades SI)

Fuente: (Fellows, 2017, p. 855)

### 2.3.3. Designación de un refrigerante

Para la designación de un refrigerante se utilizan prefijos los cuales facilitan su identificación, estas designaciones pueden ser técnicas y no técnicas, que se seleccionaran en función de su naturaleza del uso.

Los prefijos técnicos están compuestos de un número de identificación que deberá ir precedido por la letra R, que indicara que se trata de un refrigerante, la marca comercial o el nombre del fabricante, por ejemplo R 12, R-500, R-152a, R-114, entre otros (ASHRAE, 2010, p. 8).

### 2.3.4. Clasificación de los refrigerantes

Los refrigerantes pueden ser clasificados en varios grupos, entre los principales tenemos a su toxicidad y su inflamabilidad.

Según su toxicidad se dividen en dos grupos, la clase A, refrigerantes para los cuales no se ha identificado toxicidad en concentraciones  $\leq 400\text{mg/kg}$  y la clase B, refrigerantes para los cuales hay evidencia de toxicidad en concentraciones  $< 400\text{mg/kg}$  (Fellows, 2017, p. 849).

Según su inflamabilidad los refrigerantes se dividen en tres grupos, la clase 1 para refrigerantes que no se queman cuando se prueban en aire a  $21\text{ }^\circ\text{C}$  a una presión atmosférica, la clase 2 para

refrigerantes con un límite inferior de inflamabilidad de  $> 0.1\text{kg}/\text{m}^3$  a  $21^\circ\text{C}$ , una presión atmosférica y un calor de combustión  $< 19\text{ kJ}/\text{kg}$ , la clase 3 para refrigerantes que son altamente inflamables  $\leq 0.1\text{kg}/\text{m}^3$  a  $21^\circ\text{C}$ , una atmósfera de presión o un calor de combustión  $\geq 19\text{kJ}/\text{kg}$  (Fellows, 2017, p. 849).

I N F L A M A B I L I D A D		Grupo de seguridad		
		Mayor inflamabilidad	A3	B3
		Baja inflamabilidad	A2	B2
	C E R E B I L I D A D	Sin propagación de Flama	A1	B1
			Baja toxicidad	Alta toxicidad
			Toxicidad creciente →	

**Figura 14-2.** Clasificación del grupo de seguridad de refrigerantes

Fuente: (ASHRAE, 2010, p. 10)

### 2.3.5. Refrigerantes secundarios

Es un fluido encargado de transferir calor sin sufrir un cambio de fase, estos líquidos son conocidos como salmueras o refrigerantes secundarios, la selección de un refrigerante secundario depende de factores como la compatibilidad con los materiales que componen el sistema, las temperaturas y presiones de trabajo bajo las cuales va a estar sometido. Es recomendable que su punto de congelación se encuentre entre  $5$  y  $15^\circ\text{F}$  por debajo de la temperatura mínima a la cual va a estar expuesto (ASHRAE, 2018, p. 13.1).

#### 2.3.5.1. Propiedades físicas

Entre las principales propiedades físicas que se deben conocer de un refrigerante secundario están el punto de congelación, viscosidad, gravedad específica, conductividad térmica, entre otros, estas pueden ser dadas por el fabricante o se han tabulado mediante estudios particulares, en la tabla 3-2 se puede ver algunas propiedades del Etilenglicol y el Propilenglicol.

**Tabla 3-2.** Propiedades físicas del etilenglicol y Propilenglicol

Refrigerante secundario	Concentración (por peso) %	Punto de congelación °C	L/(s . kW )	Caída de presión, kPa	Coefficiente de transferencia de calor W/ (m <sup>2</sup> . K)
Propilenglicol	39	-20,6	0,0459	20,064	1164
Etilenglicol	38	-21,6	0,0495	16,41	2305
Metanol	26	-20,7	0,0468	14,134	2686
Cloruro de sodio	23	-20,6	0,0459	15,858	3169
Cloruro de calcio	22	-22,1	0,05	16,685	3214
Amoníaco líquido	14	-21,7	0,0445	16,823	3072
Tricloroetileno	100	-86,1	0,1334	14,548	2453
d-Limoneno	100	-96,7	0,116	10,204	1823
Cloruro de metileno	100	-96,7	0,1146	12,824	3322
R-11	100	-111,1	0,1364	14,341	2430

Fuente: (ASHRAE, 2017, p. 31.5)

### 2.3.5.2. Protección contra la corrosión

Todos los sistemas de salmuera deben tratarse para controlar la corrosión y los depósitos, la prevención de la corrosión comienza con la selección adecuada de los materiales de construcción e inhibidores, eliminación de contaminantes y pruebas de rutina para el pH (ASHRAE, 2018, p. 13.5) los controles de los efectos corrosivos en el sistema se deben realizar periódicamente debido a que el Cloruro de Calcio y Cloruro de Sodio son potencialmente corrosivos.

### 2.3.5.3. Cloruro de Calcio

El Cloruro de Calcio es un producto químico de gran versatilidad, entre sus características se encuentran que es un compuesto higroscópico, es decir, absorbe humedad de aire y materiales, es también deliquescente, es decir, es capaz de disolverse en la humedad que absorbe, y forma soluciones con un bajo punto de congelamiento (OCCIDENTAL CHEMICAL CHILE LIMITADA, 2006, p. 4).

El Cloruro de Calcio comercial, disponible como Tipo 1 (77% mínimo) y Tipo 2 (94% como mínimo), se comercializa en escamas, sólido y formas de solución. La forma de escamas se usa más extensamente (ASHRAE, 2017, p. 31.4), la corrosión es el principal problema para las salmueras de Cloruro de Calcio, especialmente en tanques de fabricación de hielo donde se galvanizan las latas de hierro donde se sumergen, algunas de las propiedades del Cloruro de Calcio se presentan en la tabla 4-2.

**Tabla 4-2.** Propiedades de la salmuera de Cloruro de Calcio puro

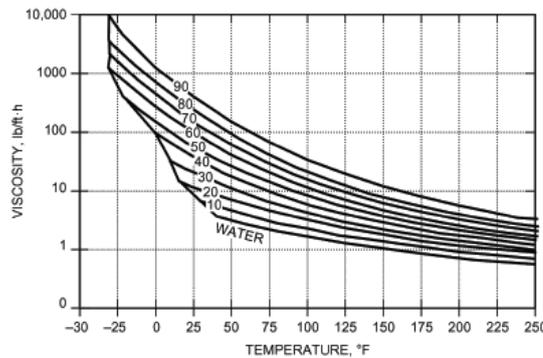
CaCl <sub>2</sub> %Puro en masa	Relación masa a agua a 60°F	Densidad relativa, grados Baumé	Calor específico a 60°F Btu/lb.*F	Inicio de cristaliza- ción *F	Masa por unidad de volumen a 60°F				Relación de masa a varias temperaturas con el agua a 60°			
					CaCl <sub>2</sub> Lb/gal	Salmuera, lb/gal	CaCl <sub>2</sub> Lb/ft <sup>3</sup>	Salmuera, lb/ft <sup>3</sup>	-4°F	14°F	32°F	50°F
0	1.000	0.0	1.000	32.0	0.000	8.34	0.00	62.40				
5	1.044	6.1	0.924	27.7	0.436	8.717	3.26	65.15			1.043	1.042
6	1.050	7.0	0.914	26.8	0.526	8.760	3.93	65.52			1.052	1.051
7	1.060	8.2	0.898	25.9	0.620	8.851	4.63	66.14			1.061	1.060
8	1.069	9.3	0.884	24.6	0.714	8.926	5.34	66.70			1.071	1.069
9	1.078	10.4	0.869	23.5	0.810	9.001	6.05	67.27			1.080	1.078
10	1.087	11.6	0.855	22.3	0.908	9.076	6.78	67.83			1.089	1.087
11	1.096	12.6	0.842	20.8	1.006	9.143	7.52	68.33			1.098	1.096
12	1.105	13.8	0.828	19.3	1.107	9.227	8.27	68.95			1.108	1.105
13	1.114	14.8	0.816	17.6	1.209	9.302	9.04	69.51			1.117	1.115
14	1.124	15.9	0.804	15.5	1.313	9.377	9.81	70.08			1.127	1.124
15	1.133	16.9	0.793	13.5	1.418	9.452	10.60	70.64		1.139	1.137	1.134
16	1.143	18.0	0.779	11.2	1.526	9.536	11.40	71.26		1.149	1.146	1.143
17	1.152	19.1	0.767	8.6	1.635	9.619	12.22	71.89		1.159	1.156	1.153
18	1.162	20.2	0.756	5.9	1.747	9.703	13.05	72.51		1.169	1.166	1.163
19	1.172	21.3	0.746	2.8	1.859	9.786	13.90	73.13		1.180	1.176	1.173
20	1.182	22.1	0.737	-0.4	1.970	9.853	14.73	73.63		1.190	1.186	1.183
21	1.192	23.0	0.729	-3.9	2.085	9.928	15.58	74.19				
22	1.202	24.4	0.716	-7.8	2.208	10.037	16.50	75.00	1.215	1.211	1.207	1.203
23	1.212	25.5	0.707	-11.9	2.328	10.120	17.40	75.63				
24	1.223	26.4	0.697	-16.2	2.451	10.212	18.32	76.32	1.236	1.232	1.228	1.224
25	1.233	27.4	0.689	-21.0	2.574	10.295	19.24	76.94				
26	1.244	28.3	0.682	-25.8	2.699	10.379	20.17	77.56				
27	1.254	29.3	0.673	-31.2	2.827	10.471	21.13	78.25				
28	1.265	30.4	0.665	-37.8	2.958	10.563	22.10	78.94				
29	1.276	31.4	0.658	-49.4	3.090	10.655	23.09	79.62				
29.87	1.290	32.6	0.655	-67.0	3.16	10.75	23.65	80.45				
30	1.295	33.0	0.653	-50.8	3.22	10.80	24.06	80.76				
32	1.317	34.9	0.640	-19.5	3.49	10.98	26.10	82.14				
34	1.340	36.8	0.630	4.3	3.77	11.17	28.22	83.57				

Fuente: (ASHRAE, 2017, p. 31.1)

### 2.3.5.4. Propilenglicol

El Propilenglicol es un producto de alta pureza, pero a la vez de baja toxicidad, entre las principales características de este producto se tiene que es un medio de transferencia de calor a bajas temperaturas, como en sistemas de enfriamiento de cervecerías o industrias de embutidos, presenta propiedades anticongelantes, además de cumplir requisitos de la FDA (*Food and Drug Administration*) y la USDA (*United States Department of Agriculture*) para aplicaciones donde puede haber contacto accidental con alimentos o agua potable (DOW, 2000, p. 5).

Las propiedades del Propilenglicol en aplicaciones industriales son muy importantes, ya que esto permite determinar las concentraciones adecuadas de las salmueras de acuerdo con la aplicación que va a tener la misma, en la tabla 5-2 se puede observar distintos valores del coeficiente de conductividad térmica del Propilenglicol en función de su temperatura y grado de concentración.



**Figura 15-2.** Viscosidad de soluciones acuosas de Propilenglicol

Fuente: (ASHRAE, 2017, p. 31.11)

**Tabla 5-2.** Conductividad térmica de una solución acuosa de Propilenglicol

Temperatura °F	Concentración en porcentaje de volumen de Propilenglicol					
	10%	20%	30%	40%	50%	60%
-30						0,156
-20					0,175	0,158
-10					0,178	0,160
0				0,201	0,181	0,162
10			0,228	0,205	0,183	0,164
20			0,232	0,208	0,186	0,166
30		0,263	0,236	0,211	0,188	0,168
40	0,298	0,267	0,24	0,214	0,191	0,170
50	0,303	0,272	0,243	0,217	0,193	0,171
60	0,308	0,276	0,247	0,220	0,195	0,173
70	0,312	0,280	0,25	0,223	0,198	0,175
80	0,317	0,284	0,253	0,225	0,200	0,176
90	0,321	0,287	0,256	0,228	0,202	0,178
100	0,325	0,291	0,259	0,230	0,203	0,179
110	0,329	0,294	0,261	0,232	0,205	0,180
120	0,332	0,296	0,264	0,234	0,206	0,181
130	0,335	0,299	0,266	0,236	0,208	0,183
140	0,338	0,301	0,268	0,237	0,209	0,183
150	0,340	0,304	0,270	0,239	0,210	0,184
160	0,343	0,305	0,271	0,240	0,211	0,185

Nota: Conductividad térmica en BTU.ft/ft2.°F

Realizado por: Autores

Fuente: (ASHRAE, 2017, p. 31.10)

## 2.4. Pista de hielo

### 2.4.1. Características generales de una pista de hielo

Una pista de hielo es un espacio en el que el suelo está cubierto por una gruesa capa de hielo nivelada natural o hecha por medios frigoríficos (Barragán & Machado , 2013, p. 33), en la actualidad las pistas de hielo son cada vez más conocidas y requeridas en distintos lugares del mundo.

Una pista de hielo debe presentar determinadas condiciones para que pueda ser utilizada en actividades tanto deportivas como de entretenimiento, como por ejemplo un adecuado acondicionamiento de aire, la suficiente iluminación, entre otros sistemas complementarios.

### 2.4.2. Equipamiento de una pista de hielo

Para el diseño de una pista de hielo se debe tener en cuenta varios aspectos tanto de la parte estructural como de la adaptación del ambiente para regular las condiciones de funcionamiento.

#### 2.4.2.1. Base de una pista de hielo

Previo a la colocación del suelo de la pista es muy importante preparar una base adecuada, en esta base se debe diseñar el drenaje de la pista evitando puntos bajos, además este será el encargado de eliminar cualquier acumulación de agua, el agua que no es drenada adecuadamente puede

congelarse por debajo de la pista pudiendo genera daños en las tuberías, cimientos, muros de contención u otras partes de la instalación, existen dos tipos básicos de piso para pistas de hielo, el piso de arena y el de concreto, estos a su vez pueden ser fijos o flotantes y pueden estar o no aislados (IIHF, 2017, p. 37).

En la base ya sea esta de concreto, grava o piedra triturada debe evitarse áreas en las cuales el suelo no esté bien asentado o presente desniveles, ya que estos defectos pueden causar daños en la pista, además se debe señalar que en caso de que su utilización sea para periodos largos de tiempo se deben colocar sistemas de calefacción debajo del piso.

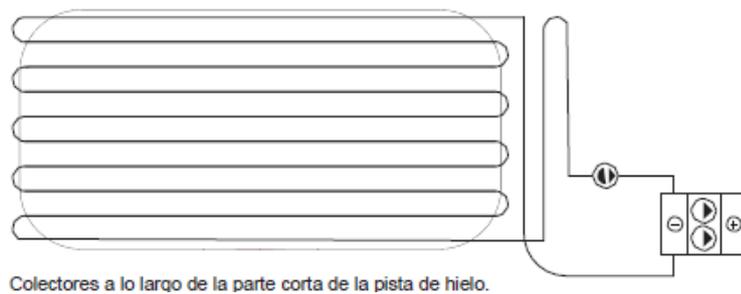


**Figura 16-2.** Piso abierto de arena sin aislamiento

Fuente: (ASHRAE, 2018, p. 44.10)

#### 2.4.2.2. Distribución de los colectores

La distribución de los colectores es muy importante, tomando en cuenta los requerimientos energéticos existentes a nivel mundial (IIHF, 2017, p. 38), se debe tener en cuenta las posibles distribuciones que serán los encargados de extraer el calor del agua a convertirse en hielo, estos pueden estar ubicados de distintas formas como se muestra en la figura 17-2.



**Figura 17-2.** Colectores a lo largo de la pista de hielo

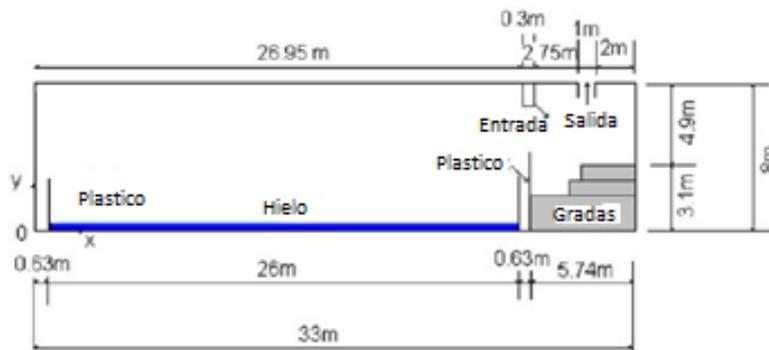
Fuente: (IIHF, 2017, p. 39)

El refrigerante secundario generalmente recorre una tubería de gran tamaño a la cual se adaptan los colectores que recorren la superficie de la pista para luego regresar mediante una tubería de recolección, generalmente estas tuberías suelen ser de acero, pero también pueden ser de polietileno de alta densidad HDPE (ASHRAE, 2018, p. 44.8).

### 2.4.2.3. Climatización

La climatización del ambiente es un factor importante, considerando que se tiene dos zonas que controlar, la primera la pista de hielo y la segunda el área del público, por eso es recomendable tener un sistema de ventilación constante (IIHF, 2017, p. 43).

Realizar una predicción adecuada para todas las pistas de hielo no es posible por el gran número de posibles diseños de edificaciones existentes, pero se debe tener en cuenta el aspecto energético, considerando los efectos que tendrá las condiciones como la dirección del aire, temperatura, velocidad (Bellache, et al., 2005, pp. 418-419).



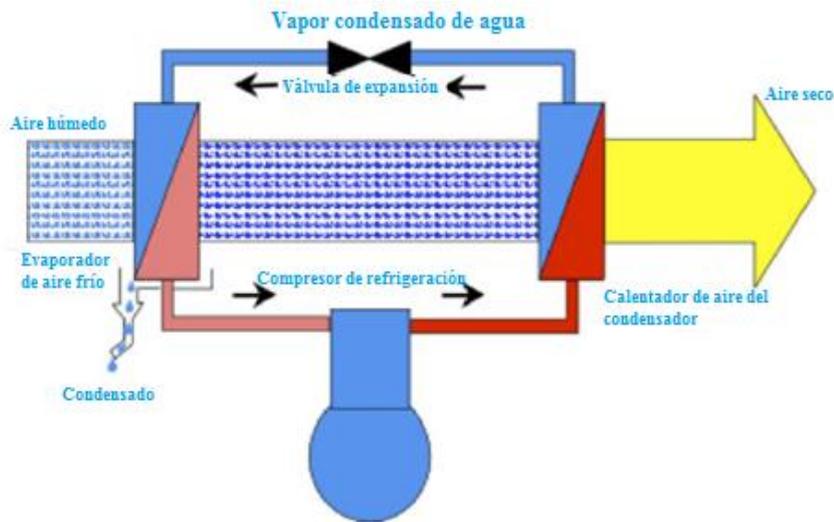
**Figura 18-2.** Sección transversal de una pista de hielo

**Fuente:** (Bellache, et al., 2005, p. 418)

### 2.4.2.4. Deshumidificación

La deshumidificación del ambiente evita que se presente problemas de corrosión en las estructuras metálicas, también controla la propagación de moho que puede incomodar a las personas que trabajan y visitan las instalaciones, además un aire húmedo puede generar porosidades en la capa superficial del hielo (Kaya, 2017, p. 18).

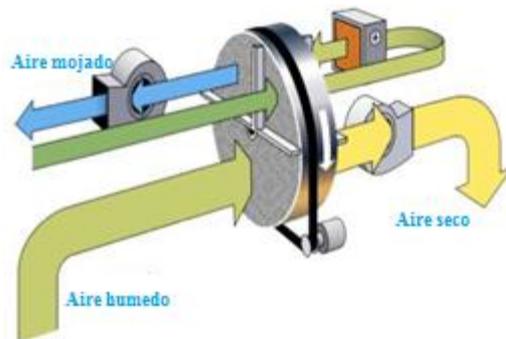
Existen dos métodos para deshumidificar el aire que circula por la pista de hielo, el uno es por condensación de vapor de agua, donde se trata de enfriar el aire húmedo por debajo de su punto de rocío, logrando que se condense y se separe para enviarlo nuevamente a la pista de hielo.



**Figura 19-2.** Principio de condensación de vapor de agua

Fuente: (Kaya, 2017, p. 18)

El segundo método es la implementación de una “rueda secante” la misma que se encuentra girando y en su interior posee un material que absorbe agua que puede ser gel de sílice, la humedad absorbida se libera al exterior como aire húmedo y el aire seco se inyecta al sistema de ventilación para que regrese a la pista, en la figura 20-2 se presenta un esquema de este sistema.



**Figura 20-2.** Sistema de humidificación secante

Fuente: (Kaya, 2017, p. 18)

## CAPITULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO: DISEÑO Y ADAPTACIÓN DEL PROTOTIPO DE PISTA DE HIELO

#### 3.1. Caracterización del equipo chiller

El prototipo de pista de hielo será implementado en el chiller que se encuentra en el Laboratorio de Energía de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con la finalidad de realizar pruebas experimentales que permitan una comparación cualitativa y cuantitativa de refrigerantes secundarios, este equipo consta de una unidad condensadora, un compresor, un evaporador, una válvula de expansión, un tanque para la salmuera, una bomba y equipos de medición.

##### 3.1.1. Caracterización del evaporador

El evaporador instalado es un intercambiador de calor de placas, consta de 30 placas y un área de transferencia de calor de 0,644 m<sup>2</sup>, en la tabla 1-3 se muestra las características del evaporador.

**Tabla 1-3.** 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 - 3Mpa
Material de la placa estándar	AISI 316L
Material de soldadura	Cobre

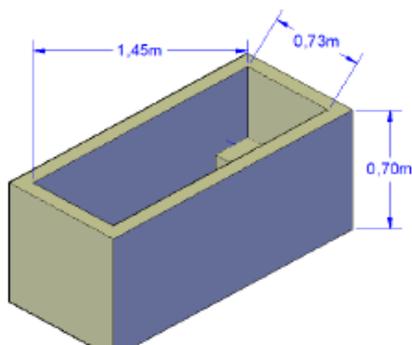
Realizado por: Autores

Fuente: (Almendariz & Lara, 2014, p. 86)

##### 3.1.2. Tanque de la salmuera

El tanque para la salmuera esta conformado por planchas de acero inoxidable de 1,5 mm de espesor y material interno aislante de 80 mm de espesor, con un alto de 0,73 m, un ancho de 0,70 m, y un largo de 1,45 m.

El volumen de salmuera recomendada para el tanque es de 500 litros, ya que con ese volumen se realizó el cálculo de las cargas frigoríficas para la selección de los componentes del equipo chiller.



**Figura 1-3.** Esquema tanque de la salmuera

**Fuente:** (Almendariz & Lara, 2014, p. 63)

### 3.1.3. Bomba de recirculación de la salmuera

La bomba de recirculación de la salmuera seleccionada fue de marca PREDOLLO de la serie PLURIJETm 4/100-N, que posee las características que se muestran en la tabla 2-3.

**Tabla 2-3.** Características de la bomba PLURIJETm 4/100-N

Bomba PLURIJETm 4/100-N	
Equipo	Bomba centrifuga autocebante
Modelo	PLURIJETm 4/100-N
Potencia	0.5 HP
Voltaje	110 V 60 Hz
Material	Carcaza y tapa: Acero inoxidable AISI 304 Eje motor: Acero inoxidable EN 10088 – 3 – 1.4104 Rodetes: Noryl FE1520PW
Temperatura de funcionamiento	Min. -10 °C máx. 40 °C
Altura máxima	50 m

**Realizado por:** Autores



**Figura 2-3.** Bomba PREDOLLO PLURIJETm 4/100-N

**Fuente:** Autores

### **3.2. Evaluación de las concentraciones de refrigerantes secundarios**

La temperatura de la capa de hielo del prototipo recomendada por ASHRAE (2018, p. 44.5) se encuentra entre  $-4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-3-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , además se recomienda que la temperatura del fluido enfriador debe encontrarse alrededor de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  por debajo de la temperatura de la capa de hielo, tomando en cuenta las consideraciones anteriores se propone una temperatura de  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  para la capa de hielo del prototipo.

#### **3.2.1. Evaluación del Propilenglicol como refrigerante secundario**

Para la adecuada selección de la concentración del Propilenglicol se tomó en cuenta estudios previos realizados con este refrigerante secundario. Los resultados de estos estudios mostraron que con una concentración del 15% la temperatura mínima alcanzada en el chiller es de  $-4,302\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Guaman & Muñoz , 2017, p. 61) y no cumple con la diferencia de temperatura recomendada por ASHRAE.

La concentración al 21% de la salmuera llega hasta una temperatura de  $-7,21\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Guaman & Muñoz , 2017, p. 68) a la salida del chiller, cumpliendo la recomendación de la norma, y la concentración del 30% alcanza una temperatura de  $-10,13\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Guaman & Muñoz , 2017, p. 77) a la salida del chiller cumpliendo también la recomendación de ASHRAE.

Para el análisis se toma en cuenta una apertura de la válvula de alimentación del 100% debido a que con aperturas menores se encuentran valores de caudal muy cercanos a los tomados y el cierre de la válvula solo genera pérdidas en el sistema.

Se debe tener en cuenta que la capacidad que tiene la salmuera para absorber calor es directamente proporcional al flujo masico, es decir, que a menor caudal menor será el calor disipado por la salmuera. Por lo tanto, es recomendable tener una apertura de la válvula del 100%

#### **3.2.2. Evaluación del Cloruro de Calcio como refrigerante secundario**

Para la adecuada selección de la concentración del Cloruro de Calcio se tomó en cuenta estudios previos. Los resultados de estos estudios mostraron que con una concentración del 15% baja a una temperatura de  $-10,43$ , la concentración al 21% de la salmuera llega hasta una temperatura de  $-10,57\text{ }^{\circ}\text{C}$  a la salida del chiller, y la concentración del 30% alcanza una temperatura de  $-10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  a la salida del chiller (Macas & Toinga, 2015, p. 117) cumpliendo en todos los casos la recomendación de ASHRAE. Sin embargo, Macas y Toinga (2015, p. 129) recomiendan no utilizar concentraciones de Cloruro de Calcio mayores al 21% debido a que existen problemas de recalentamiento en los equipos por su alta densidad.

Para la evaluación se toma en cuenta una apertura de la válvula de alimentación del 100% debido a que con aperturas menores se encuentran valores muy cercanos, pero se incrementan los tiempos de enfriamiento y se genera pérdidas en el sistema.

Se debe tener en cuenta que la capacidad que tiene la salmuera para absorber calor es directamente proporcional al flujo masico, es decir, que a menor caudal, menor será el calor disipado por la salmuera. Por lo tanto, es recomendable tener una apertura de la válvula del 100%

### **3.3. Diseño del prototipo de pista hielo**

La implementación del prototipo de pista de hielo se basa en la capacidad de refrigeración del chiller instalado en el Laboratorio de Energía de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

#### **3.3.1. Dimensiones del prototipo**

Para el diseño del prototipo se toma en cuenta el criterio de semejanza geométrica con respecto a pistas de hielo, las cuales se encuentran en una relación cercana de 1 a 2 respecto al ancho y largo de la misma, como es el caso de las dimensiones de una pista hockey que pueden ser de 25,9 m. por 56,4 m. (ASHRAE, 2018, p. 44.1), el prototipo a ser implementado será de 1m. de largo y 0,5 m. de ancho, esto debido al espacio disponible en el Laboratorio de Energía donde se encuentra ubicado el equipo chiller, con un área de:

$$A_s = l \times a \quad (23)$$

$$A_s = 1 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$$

$$A_s = 0,5 \text{ m}^2$$

#### **3.3.2. Diseño de la base de la pista de hielo**

Para el diseño del prototipo de pista de hielo se toma en cuenta algunas recomendaciones de ASHRAE, además se considera la disponibilidad de los elementos en el mercado y la facilidad de adquisición de dichos elementos.

La base estará apoyada sobre una plancha de acero que representa el suelo natural, la cual constará de cuatro niveles, en el primer nivel la gravilla sobre la cual se encuentra un aislante que evita las pérdidas de calor. Este aislante es de poliuretano extruido el cual es de un material rígido muy resistente al agua y de un espesor de 10 centímetros. Sobre este aislante se encuentra una capa de breña cuya función es la impedir que existan focos de humedad entre el aislante y la plancha de acero de 1 milímetro de espesor. Sobre la plancha de acero descansa la tubería de recirculación de la salmuera, esta tubería estará cubierta por una capa de arena sobre la cual se formará la capa de hielo como se muestra en el esquema de la figura 3-3:



**Figura 3-3.** Esquema de la base del prototipo de pista de hielo

Fuente: Autores

### 3.3.3. Capacidad frigorífica de la salmuera

La capacidad frigorífica de la salmuera se calcula a través de la ecuación de calor sensible ya que esta no sufre cambio de fase, para esto se realiza el cálculo a las concentraciones especificadas anteriormente.

Para la concentración de la salmuera de Propilenglicol al 21% se obtiene los valores de caudal y temperatura que se muestran en la tabla 3-3

**Tabla 3-3.** Propiedades salmuera Propilenglicol al 21%

Caudal	$0,581 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$
Temperatura mínima	$-7,21 \text{ }^\circ\text{C}$
Densidad	$1028.21 \frac{Kg}{m^3}$
Calor específico	$3,8634 \frac{KJ}{Kg K}$
Diferencial de temperatura	$0,25 \text{ }^\circ\text{C}$

Realizado por: Autores

Fuente: (Guaman & Muñoz , 2017, p. 109)

Los valores de calor específico y densidad se tomaron de las gráficas suministradas por ASHRAE de acuerdo con la temperatura mínima alcanzada por la salmuera que se muestran en el ANEXO A

El flujo másico está definido por:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (24)$$

Donde:

$\dot{V}$ : Caudal [ $m^3/s$ ]

$\rho$ : Densidad [ $Kg/m^3$ ]

$$\dot{m}_1 = (1028,21 \frac{Kg}{m^3})(0,581 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s})$$

$$\dot{m}_1 = 0,597 \frac{Kg}{s}$$

$$q_{s1} = \dot{m}_1 \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$q_{s1} = (0,597 \frac{Kg}{s}) \cdot (3,864 \frac{KJ}{Kg K}) \cdot (0,25K)$$

$$q_{s1} = 577,13 W$$

Para la concentración de la salmuera de Propilenglicol al 30% se obtiene los valores de caudal y temperatura que se muestran en la tabla 4-3:

**Tabla 4-3.** Propiedades salmuera de Propilenglicol al 30%

Caudal	$0,582 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$
Temperatura final	-10,13 °C
Densidad	$1041,02 \frac{Kg}{m^3}$
Calor específico	$3,768 \frac{KJ}{Kg K}$
Diferencial de temperatura	0,25 °C

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Guaman & Muñoz , 2017, p. 109)

Los valores de calor específico y densidad se tomaron de las gráficas suministradas por ASHRAE de acuerdo con la temperatura mínima alcanzada por la salmuera que se muestran en el ANEXO B

$$\dot{m}_2 = \rho \cdot \dot{V}$$

$$\dot{m}_2 = (1041,02 \frac{Kg}{m^3})(0,582 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s})$$

$$\dot{m}_2 = 0,605 \frac{Kg}{s}$$

$$q_{s2} = \dot{m}_2 \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$q_{s2} = (0,605 \frac{Kg}{s}) \cdot (3,768 \frac{KJ}{Kg K}) \cdot (0,25 K)$$

$$q_{s2} = 570,40W$$

Para la concentración de la salmuera de Cloruro de Calcio al 15% se obtiene los valores de caudal y temperatura que se muestran en la tabla 5-3:

**Tabla 5-3.** Propiedades salmuera de Cloruro de Calcio al 15%

Caudal	$0,579 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$
Temperatura final	-10,43 °C
Densidad	$1142 \frac{Kg}{m^3}$
Calor específico	$3,286 \frac{KJ}{Kg K}$
Diferencial de temperatura	0,25 °C

Realizado por: Autores

Fuente: (Guaman & Muñoz , 2017, p. 109)

Los valores de calor específico y gravedad específica se tomaron de las gráficas suministradas por ASHRAE de acuerdo con la temperatura alcanzada por la salmuera que se muestran en el ANEXO C

$$\dot{m}_3 = \rho \cdot \dot{V}$$

$$\dot{m}_3 = (1142 \frac{Kg}{m^3})(0,579 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s})$$

$$\dot{m}_3 = 0,661 \frac{Kg}{s}$$

$$q_{s3} = \dot{m}_3 \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$q_{s3} = (0,661 \frac{Kg}{s}) \cdot (3,286 \frac{KJ}{Kg K}) \cdot (0,25K)$$

$$q_{s3} = 543,28 W$$

Para la concentración de la salmuera de Cloruro de Calcio al 21% se obtiene los valores de caudal y temperatura que se muestran en la tabla 6-3:

**Tabla 6-3.** Propiedades salmuera de Cloruro de Calcio al 21%

Caudal	$0,570 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$
Temperatura promedio	-10,57 °C
Densidad	$1197 \frac{Kg}{m^3}$
Calor específico	$2,981 \frac{KJ}{Kg K}$
Diferencial de temperatura	0,25 °C

Realizado por: Autores

Los valores de calor específico y gravedad específica se tomaron de las gráficas suministradas por ASHRAE de acuerdo con la temperatura alcanzada por la salmuera que se muestran en el ANEXO D

$$\begin{aligned}\dot{m}_4 &= \rho \cdot \dot{V} \\ \dot{m}_4 &= \left(1197 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(0,570 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}\right) \\ \dot{m}_4 &= 0,683 \frac{Kg}{s} \\ q_{s4} &= \dot{m}_4 \cdot C_p \cdot \Delta T \\ q_{s4} &= \left(0,683 \frac{Kg}{s}\right) \cdot \left(2,981 \frac{KJ}{Kg K}\right) \cdot (0,25 K) \\ q_{s4} &= 509,74 W\end{aligned}$$

Basado en estos cálculos se toma el valor de  $q_{s4}$  correspondiente a la concentración del 21% del Cloruro de Calcio.

### 3.3.4. Cálculo de cargas frigoríficas

Entre las cargas frigoríficas presentes tenemos la necesaria para la formación del hielo, la carga por convección del hielo y el aire sobre la pista, la carga por radiación entre la pista y el entorno, la carga por iluminación y pérdidas del sistema.

#### 3.3.4.1. Cálculo del calor por convección

El calor por convección se ve afectado por la temperatura del aire que circunda la pista de hielo, además de la velocidad del viento generada por los ocupantes, para el cálculo del coeficiente convectivo ASHRAE (2018, p. 44.3) recomienda utilizar la expresión:

$$h = 3,41 + 3,55 V \quad (25)$$

Donde:

$h$ : Coeficiente conectivo de transferencia de calor [ $W/m^2 K$ ]

$V$ : Velocidad del viento [m/s]

Para el prototipo se implementará un ventilador encargado de recrear condiciones reales del movimiento del aire en el interior de la pista, con una velocidad de 2 m/s.

$$h = 3,41 + 3,55 \left(2 \frac{m}{s}\right)$$

$$h = 10,51 \frac{W}{m^2 K}$$

El calor por convección está dado por la ecuación 6.

$$q_{conv} = h_c A_s (t_\infty - t_s)$$

La temperatura promedio del aire alrededor de la pista es de 15 °C la temperatura del hielo es de -3°C.

$$q_{conv} = \left(10,51 \frac{W}{m^2 K}\right) (0,5 m^2) (15 C - (-3 C))$$

$$q_{conv} = 94,59 W$$

### 3.3.4.2. Cálculo del calor por Radiación

Para el cálculo del calor por radiación se utiliza la siguiente ecuación 15

$$q_{net} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4)$$

Además, ASHRAE recomienda la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \left[ \frac{1}{F_{ci}} + \left( \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) + \frac{A_c}{A_i} \left( \frac{1}{\varepsilon_i} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (26)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Factor de configuración del cuerpo gris, superficie del techo al hielo

$F_{ci}$ : Factor de ángulo, interfaz techo a hielo

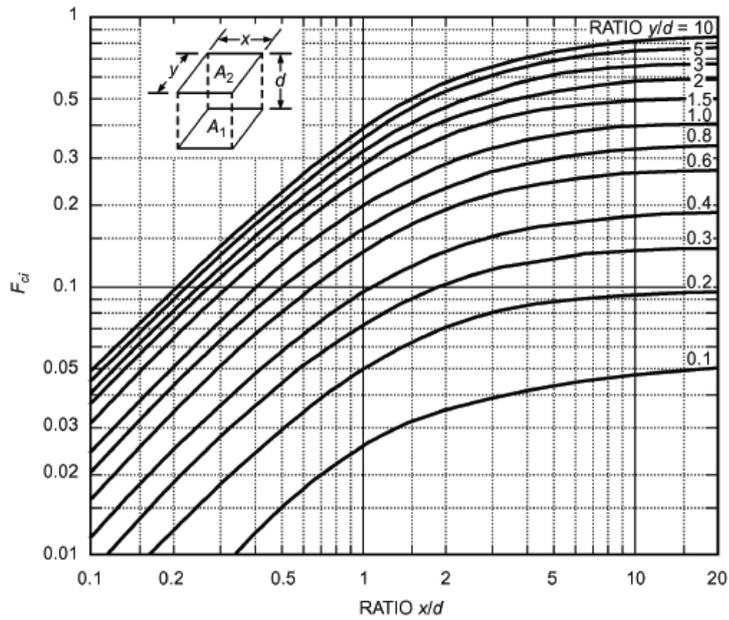
$\varepsilon_c$ : Emisividad del techo de la pista

$A_c$ : Área del techo [ $m^2$ ]

$A_i$ : Área del hielo [ $m^2$ ]

$\varepsilon_i$ : Emisividad del hielo

El valor de  $F_{ci}$  se encuentra en el gráfico 1-3



**Gráfico 1-3.** Factor de ángulo por radiación entre paredes rectangulares  $F_{ci}$

**Fuente:** (ASHRAE, 2018, p. 44.4)

Para el cálculo se toman las siguientes consideraciones:

**Tabla 7-3.** Dimensiones para el cálculo de calor por radiación

Largo de la pista $y$	1 m
Ancho de la pista $x$	0,5 m
Temperatura del hielo $T_{surr}$	270 K
Temperatura del techo $T_s$	287 K
Área del techo $A_c$	0,5 m <sup>2</sup>
Altura del techo $d$	0,3 m
Emisividad del hielo $\varepsilon_i$	0,99
Emisividad del techo $\varepsilon_c$	0,90
Constante de Stefan Boltzmann $\sigma$	5,67 x10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> . K <sup>4</sup>

**Realizado por:** Autores

**Fuente:** (Çengel, 2007, p. 865)

$$\frac{x}{d} = \frac{0,5}{0,3}$$

$$\frac{x}{d} = 1,66$$

$$\frac{y}{d} = \frac{1}{0,3}$$

$$\frac{y}{d} = 3,33$$

Del gráfico 1-3 obtenemos el valor de  $F_{ci}$

$$F_{ci} = 0,46$$

$$\varepsilon = \left[ \frac{1}{F_{ci}} + \left( \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) + \frac{A_c}{A_i} \left( \frac{1}{\varepsilon_i} - 1 \right) \right]^{-1}$$

$$\varepsilon = \left[ \frac{1}{0,46} + \left( \frac{1}{0,9} - 1 \right) + \frac{0,5}{0,5} \left( \frac{1}{0,99} - 1 \right) \right]^{-1}$$

$$\varepsilon = 0,435$$

Reemplazando en la ecuación 15 tenemos

$$q_{rad} = (0,435) (5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}) (0,5 m^2) (287^4 - 270^4) K$$

$$q_{rad} = 18,16 W$$

### 3.3.4.3. Calor disponible para la formación del hielo

La capacidad frigorífica disponible será igual a la capacidad total menos las cargas por convección, radiación e iluminación.

$$q_{disp} = q_{total} - q_{conv} - q_{rad} \quad (27)$$

$$q_{disp} = 509,07 W - 94,59 W - 18,16 W$$

$$q_{disp} = 396,32 W$$

### 3.3.4.4. Cálculo del espesor de la capa de hielo

Para la formación del hielo se toma un tiempo estimado de formación de dos horas, además se debe tomar en cuenta el calor sensible para disminuir la temperatura del agua hasta 0 °C, luego el calor latente para el cambio de fase y finalmente el calor sensible para disminuir la temperatura del hielo hasta -3 °C, esto se lo realiza mediante la expresión:

$$q_{FH} = 1000 \cdot V_f \cdot (4,2 \cdot (t_f - 0) + 344 + 2,0 (0 - t_i)) \quad (28)$$

Donde:

$q_{FH}$ : Calor para la formación de hielo [KJ]

$V_f$ : Volumen de agua [ $m^3$ ]

$t_f$ : Temperatura del agua [ $^{\circ}C$ ]

$t_i$ : Temperatura del hielo [ $^{\circ}C$ ]

Donde el volumen del hielo estará en función de las dimensiones del prototipo y el espesor de la capa de hielo.

$$q_{FH} = 1000 \cdot (1 \times 0,5 \times e) \cdot (4,2 \cdot (19) + 344 + 2,0 \cdot (-(-3)))$$

$$q_{FH} = 214900e \text{ KJ}$$

Para un tiempo estimado de formación del hielo de una hora se obtiene:

$$q_{FH} = \frac{214900e \text{ KJ}}{7200 \text{ s}}$$

$$q_{FH} = 29847,22 e \text{ W}$$

Igualando el calor disponible y el calor requerido para la formación del hielo se obtiene el espesor ideal de la capa de hielo.

$$q_{FH} = q_{disp}$$

$$29847,22e \text{ W} = 396,32 \text{ W}$$

$$e = 0,0132m$$

$$e = 1,32 \text{ cm}$$

$$e_{aprox.} = 1 \text{ cm}$$

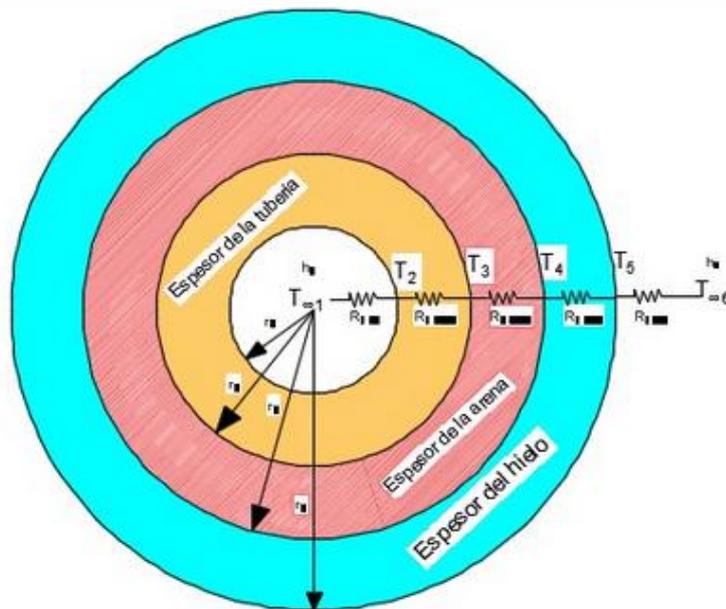
Debido a factores externos como el cambio de temperatura en el ambiente y calor generado por la bomba se toma un espesor aproximado de 1 cm.

### **3.3.5. Dimensionamiento del serpentín**

Para el dimensionamiento del serpentín es necesario evaluar la base sobre la que descansará la pista de hielo que consta de las partes indicadas en la figura 4-3. Para evitar al máximo las pérdidas de calor, la base de la pista consta de varias capas, para el análisis de la longitud de la tubería solo se tomará en cuenta la parte superior de la tubería, debido a que en la parte inferior de la misma las pérdidas de calor son mínimas y no interfieren en el cálculo de la longitud del serpentín.

Para el diseño del serpentín se utiliza el método del LMTD, para calcular la longitud del serpentín interviene tanto el área transversal como la temperatura media logarítmica como se indica en la

ecuación 20, además para el cálculo de las resistencias térmicas se toman como resistencias en cilíndricas como se muestran en la siguiente figura:



**Figura 4-3.** Resistencias térmicas en la base del prototipo

Fuente: Autores

Donde:

$T_{\infty 1}$ : Temperatura de la salmuera [°C]

$R_{c\ sal}$ : Resistencia por convección de la salmuera [k m<sup>2</sup>/W]

$R_{K\ cobre}$ : Resistencia por conducción de la tubería de cobre [k m<sup>2</sup>/W]

$R_{k\ arena}$ : Resistencia por conducción de la arena [k m<sup>2</sup>/W]

$R_{K\ acero}$ : Resistencia por conducción del acero [k m<sup>2</sup>/W]

$R_{k\ hielo}$ : Resistencia por conducción del hielo [k m<sup>2</sup>/W]

$T_{\infty 2}$ : Temperatura del aire [°C]

En primer lugar, se calcula la velocidad de la salmuera en el interior del serpentín para comprobar que se encuentre dentro de límites aceptables la misma que se encuentra en función del caudal y del área transversal de la tubería.

Además, el coeficiente por convección de la salmuera está en función de parámetros adimensionales como el número de Reynolds y el número de Prandtl y se calcula con los datos de la tabla 9-3.

Los datos de conductividad térmica y la viscosidad dinámica se pueden leer en las gráficas que se muestran en el ANEXO E.

**Tabla 8-3.** Datos para cálculo de coeficiente convectivo

Diámetro nominal de la tubería $\phi$	$\frac{3}{4} \text{ in}$
Diámetro interno	0,020601 m
Temperatura de la salmuera	$-10,57^\circ \text{C}$
Densidad de la salmuera	$1197 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$
Conductividad térmica	$0,5451 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$
Viscosidad dinámica	$9 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}$

Realizado por: Autores

Fuente: (ASHRAE, 2017, p. 31.2)

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad (29)$$

$$v = \frac{0,000570 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi}{4} (0,020601 \text{ m})^2}$$

$$v = 1,71 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Numero de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot v}{\mu}$$

$$Re = \frac{(1197) \cdot (0,020601) \cdot (1,171)}{9 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 4685,28$$

Número de Prandtl:

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{(2,981) \cdot (9 \times 10^{-3})}{0,5451}$$

$$Pr = 49,21$$

Numero de Nusselt:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,3} \quad (30)$$

$$Nu = 0,023 \cdot 4685,28^{0,8} 49,21^{0,3}$$

$$Nu = 63,96$$

$$h_{sal} = \frac{Nu \cdot K}{D}$$

$$h_{sal} = \frac{(63,96) \cdot (0,5451)}{0,020601} \frac{W}{m^2K}$$

$$h_{sal} = 1692,37 \frac{W}{m^2K}$$

Cálculo de la resistencia total lo realizamos con la ecuación 31 y con los datos de la tabla 10-3, tomando en cuenta la resistencia por convección de la salmuera y las resistencias por conducción del cobre, de la arena y del hielo.

Los datos de conductividad térmica tanto de la arena como del hielo se pueden observar en el ANEXO F

**Tabla 9-3.** Datos para cálculo de resistencias térmicas

Radio interno de la tubería $r_1$	0,01030 m
Radio externo de la tubería $r_2$	0,011125 m
Radio de recubrimiento de arena $r_3$	0,01612 m
Radio de recubrimiento de hielo $r_4$	0,02125 m
Conductividad térmica de la arena $K_{arena}$	$1 \frac{W}{m^{\circ}K}$
Conductividad térmica de hielo $K_{hielo}$	$1,91 \frac{W}{m^{\circ}K}$
Conductividad térmica del cobre $K_{Cu}$	$385 \frac{W}{m^{\circ}K}$

Realizado por: Autores

Fuente: (Çengel, 2007, p. 853)

$$\sum R_T = \left( \frac{1}{h_{salmuera} * A} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_{Cu} * L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi * K_{arena} * L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi * K_{hielo} * L} \right) \quad (31)$$

$$\sum R_T = \left( \frac{1}{1692,37 * 2\pi * 0,01030 * L} + \frac{\ln\left(\frac{0,01112}{0,01030}\right)}{2\pi * 385 * L} + \frac{\ln\left(\frac{0,01612}{0,01112}\right)}{2\pi * 1 * L} + \frac{\ln\left(\frac{0,021125}{0,01612}\right)}{2\pi * 1,91 * L} \right)$$

$$\sum R_T = \frac{0,0907}{L}$$

$$U * A = \frac{1 * L}{0,0907}$$

$$U * A = 11,01 * L$$

Para el cálculo de LMTD se divide en dos tramos debido a que existe un cambio de fase en el fluido que interviene tanto el calor sensible como el calor latente (Hernández & Trujillo, 2015, p. 45), para lo cual se toma la siguiente ecuación:

$$LMTD = \frac{Q}{\frac{Q_{s\ agua}}{LMTD_1} + \frac{Q_{s\ refr}}{LMTD_2}}$$

Donde:

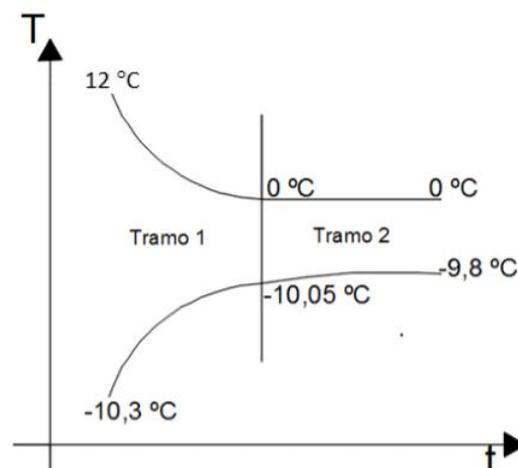
$Q$ : Calor total

$Q_{s\ agua}$ : Calor sensible del agua

$Q_{s\ refr}$ : Calor sensible del refrigerante

$LMTD_1$ : Temperatura media logarítmica del primer tramo

$LMTD_2$ : Temperatura media logarítmica del segundo tramo



**Gráfico 2-3** Temperaturas para cálculo de LMTD

Fuente: Autores

El valor de LMTD para el tramo 1 está dado por:

$$LMTD_1 = \frac{(12 - (-10,3)) - (0 - (-10,05))}{\ln\left(\frac{(12 - (-10,3))}{0 - (-10,05)}\right)}$$

$$LMTD_1 = 15,37$$

El valor de LMTD para el tramo 2 está dado por:

$$LMTD_2 = \frac{(0 - (-10,05)) - (0 - (-9,8))}{\ln\left(\frac{(0 - (-10,05))}{0 - (-9,8)}\right)}$$

$$LMTD_2 = 9,92$$

El valor del LMTD para el caso es igual a:

$$LMTD = \frac{570,64}{\frac{60,90}{15,37} + \frac{509,74}{9,92}}$$

$$LMTD = 10,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para el cálculo de la longitud del serpentín utilizamos el calor generado por la salmuera en el sistema, sabiendo que el área está en función del diámetro y la longitud del serpentín:

$$Q_T = U * A * F * LMTD$$

$$509,07 \text{ W} = 11,01 * L * 1 * 10,31$$

$$L = 4,48 \text{ m}$$

Esta longitud se duplica ya que la transferencia de calor del agua a la tubería con la salmuera ocurre solo por la parte superior, y la parte inferior de la tubería se encuentra aislada térmicamente, por lo que tenemos:

$$L = 4,48 * 2 \text{ m}$$

$$L = 8,96 \text{ m}$$

### 3.4. Implementación del prototipo de pista de hielo

Para la implementación del prototipo de pista de hielo se toma como punto de partida la estructura encargada de soportar las partes mecánicas e instrumentos electrónicos, se inicia con la colocación y adaptación de la base, luego la colocación de serpentín por el cuál circulara la salmuera, y finalmente los equipos electrónicos de medición y adquisición de datos.

### **3.4.1. Adaptación de la base**

La adaptación de la base se la realizó tomando el diseño realizado anteriormente, la plancha de acero inoxidable fue soldada a la estructura para asegurar que resista el peso todos los elementos de la base, sobre ella se ubicó el aislante térmico, seleccionando en este caso una plancha de poliuretano, luego se colocó una capa de brea adherida a una plancha de acero inoxidable sobre la cual se colocara el serpentín de recirculación, como se indica en la figura 5-3:



**Figura 5-3.** Montaje de la base del prototipo de pista de hielo

Fuente: Autores

### **3.4.2. Montaje del serpentín**

El serpentín se lo ubicó sobre una pequeña capa de arena sobre la plancha de acero inoxidable, esto con la finalidad de darle estabilidad a la misma, el serpentín fue fabricado con tubería de cobre de 3/4", y distribuida a lo largo de la superficie de la pista para asegurar que la transferencia de calor pueda realizarse de manera uniforme.



**Figura 6-3.** Montaje de serpentín y arena en el prototipo

Fuente: Autores

### 3.4.3. Montaje de equipos de medición

Los equipos medición utilizados para este proyecto serán los encargados de tomar datos de caudal, presión y temperatura en el sistema, para la medición de temperatura se utilizaron termopares tipo K los mismos que fueron ubicados a la entrada y a la salida del serpentín, esto con la finalidad de medir el diferencial de temperatura que presente la salmuera luego de atravesar el sistema extrayendo calor del mismo.



**Figura 7-3.** Termocuplas tipo K

Fuente: Autores



**Figura 8-3.** Termopares a la entrada y salida del serpentín

Fuente: Autores

El caudalímetro se encuentra instalado a la salida del chiller y antes de la entrada a la pista, esto con la finalidad de conocer el flujo que va a circular por el serpentín, además se instaló un manómetro a la salida de la bomba que servirá para verificar el correcto funcionamiento de la misma, previniendo de esta manera paros inesperados en el sistema con el chiller o con la recirculación de la salmuera por el prototipo como se puede observar en las figuras 9-3 y 10-3.



**Figura 9-3.** Caudalímetro

**Fuente:** Autores



**Figura 10-3.** Manómetro instalado a la salida de bomba

**Fuente:** Autores

#### **3.4.4. Implementación del sistema de adquisición de datos**

Para el sistema de adquisición de datos se utilizó una tarjeta DAC por sus siglas en inglés “*Digital to analogue converter*” de la serie NI cDAQ-9174 de la marca *National Instruments* como se indica en la figura 11-3, en esta se realizó la instalación de las termopares tipo K, así como la adecuación del caudalímetro, el mismo que necesitó de una resistencia para poder convertir su señal en una que pueda ser receptada por la tarjeta, en la figura 12-3 se puede observar la conexión de los instrumentos en la tarjeta DAC.



**Figura 11-3.** Tarjeta Dac NI cDAQ-9174

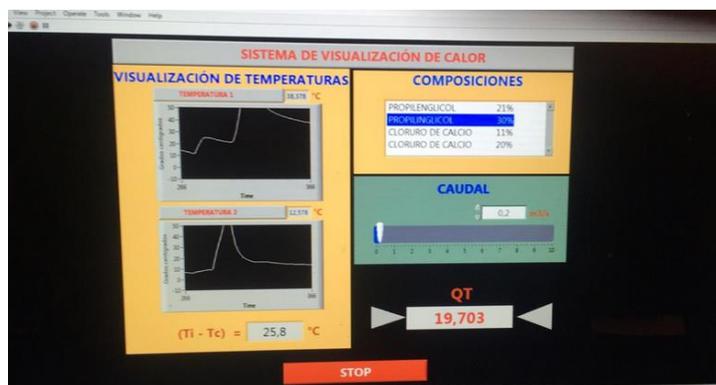
Fuente: Autores



**Figura 12-3.** Instalación de termopares y caudalímetro a la DAC

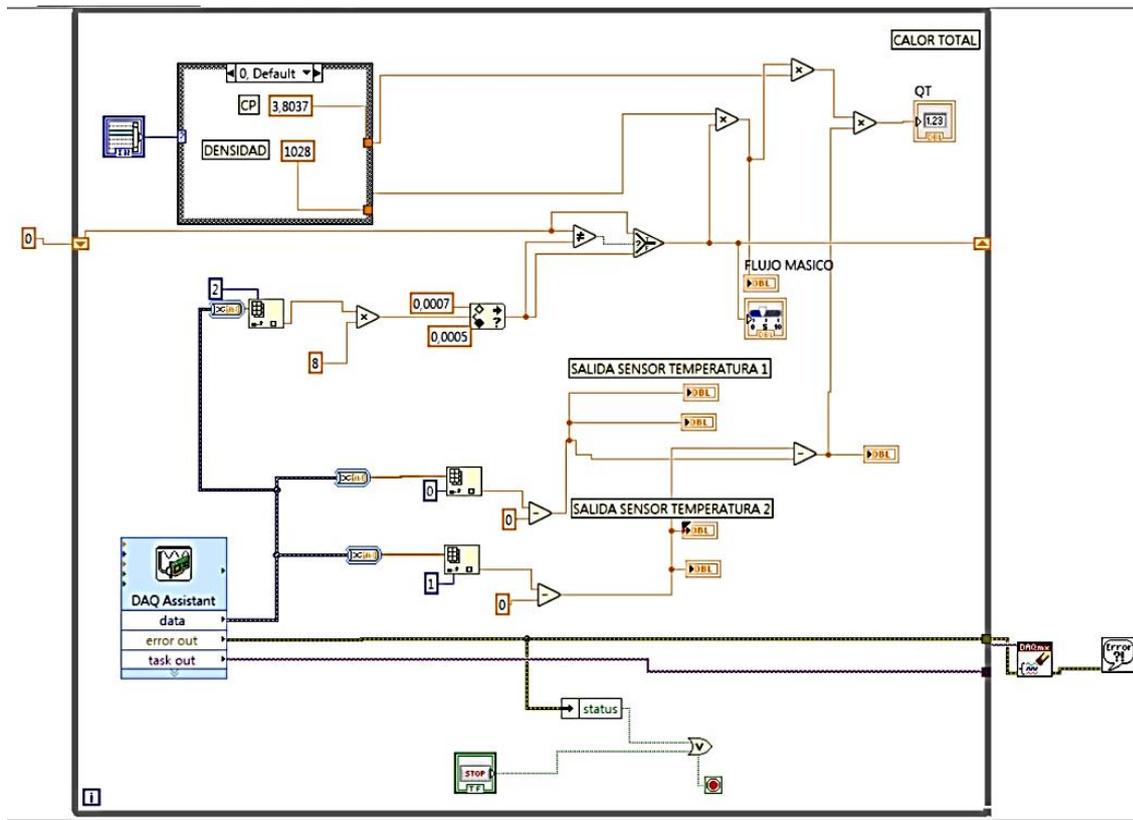
Fuente: Autores

La programación se realizó con la ayuda del Software LABVIEW 2018 programa de la compañía *National Instruments*, debido a que las tarjetas son de la misma marca resulta relativamente fácil programar las señales tanto de temperatura como de caudal, estos datos de temperatura y caudal se muestran en tiempo real dando errores mínimos en la lectura de datos para su posterior análisis, permitiendo obtener una pantalla de visualización de los datos provenientes del sistema como se indica en la figura 13-3.



**Figura 13-3.** Pantalla de visualización de datos

Fuente: Autores



**Figura 14-3.** Programación tarjeta de adquisición de datos

Realizado por: Autores

## CAPITULO IV

### 4. FASE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

#### 4.1. Prueba 1. Salmuera Cloruro de Calcio al 21%

Para las pruebas con la salmuera de Cloruro de Calcio se baja la temperatura de esta hasta aproximadamente -2 grados centígrados para poder formar la capa de hielo, mientras que los datos que se obtienen mediante los diferentes tipos de sensores como la temperatura de entrada de la salmuera a la pista, la temperatura de salida, el caudal, la temperatura del agua de la pista y la presión son tabulados para su posterior análisis.

Se baja la temperatura de la salmuera hasta menos -10 grados centígrados debido a que a más bajas temperaturas existen problemas de congelamiento de la bomba.

La temperatura del agua baja hasta cero grados y comienza su cambio de fase hasta congelarse por completo y formar la pista de hielo de 1 cm de alto, para formar esta capa de hielo en la pista se debe seguir un procedimiento, primero se cubre las tuberías de agua y una vez que esta capa está congelada se le añade capas de un milímetro de espesor hasta completar la altura de hielo deseada.

Para la preparación de la salmuera de Cloruro de Calcio al 21% se encuentra la masa del soluto del producto necesario para encontrar la concentración deseada de la siguiente manera:

$$m_{\text{soluto}} = \frac{\% \text{ concentración} * m_{\text{solución}}}{100\%} \quad (32)$$

$$m_{\text{soluto}} = \frac{\% \text{ concentración} * \rho_{\text{solución}} * V_{\text{solución}}}{100\%}$$

$$m_{\text{soluto}} = \frac{21\% * 1190 * 0,218}{100\%}$$

$$m_{\text{soluto}} = 54,47 \text{ Kg}$$

Con la masa del soluto se procede a realizar el cálculo del volumen de agua necesario para obtener 218 litros de la concentración deseada.

$$m_{\text{agua}} = m_{\text{total}} - m_{\text{soluto}}$$

$$m_{\text{agua}} = 1190 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0,218 \text{ m}^3 - 54,47 \text{ Kg}$$

$$m_{\text{agua}} = 204,95 \text{ Kg}$$

$$V_{\text{agua}} = 204,95 \text{ Litros}$$

Para la prueba 1 se toman las siguientes consideraciones:

Fecha: 20 de junio de 2019

Hora: 10:00 AM

Temperatura ambiente 12 °C

Temperatura del agua 11 °C

**Tabla 1-4.** Resultados prueba experimental con Cloruro de Calcio al 21%

Tiempo (minutos)	Caudal (l/min)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)	Delta T (°C)	Presión (psi)	Temperatura del agua (°C)
0	34,6	-2,0	-1,77	0,23	32	11
5	34,6	-3,0	-2,55	0,45	32	8,1
10	34,6	-4,0	-3,70	0,30	32	5
15	34,6	-5,0	-4,70	0,30	32	2,1
20	34,6	-6,2	-5,90	0,30	32	0
25	34,6	-6,6	-6,30	0,30	32	0
30	34,6	-7,2	-6,90	0,30	32	0
35	34,6	-7,6	-7,30	0,30	32	0
40	34,6	-8,2	-7,92	0,28	32	0
45	34,6	-8,5	-8,18	0,32	30	0
50	34,1	-9,1	-8,70	0,40	40	0
55	33,8	-9,8	-9,50	0,30	50	0
60	33,8	-10,4	-10,1	0,30	60	0
65	33,8	-10,0	-9,70	0,30	60	0
70	33,8	-10,0	-9,75	0,25	40	0
75	34,2	-9,6	-9,30	0,30	40	0
80	34,6	-9,1	-8,82	0,28	40	0
85	34,6	-8,5	-8,20	0,30	38	0
90	34,6	-8,0	-7,75	0,25	32	0
95	34,6	-7,4	-7,12	0,28	30	0
100	34,6	-6,9	-6,61	0,29	30	0
105	32,5	-7,6	-7,35	0,25	30	0
110	32,5	-8,3	-8,07	0,23	30	0
115	33,8	-9,2	-8,95	0,25	40	0
120	33,8	-9,9	-9,60	0,30	45	0
125	33,8	-9,3	-9,02	0,28	45	0
130	34,6	-8,7	-8,45	0,25	40	0
135	34,6	-8,1	-7,90	0,20	30	0
140	34,6	-7,6	-7,35	0,25	30	-1
145	34,6	-7,0	-6,77	0,23	30	-3

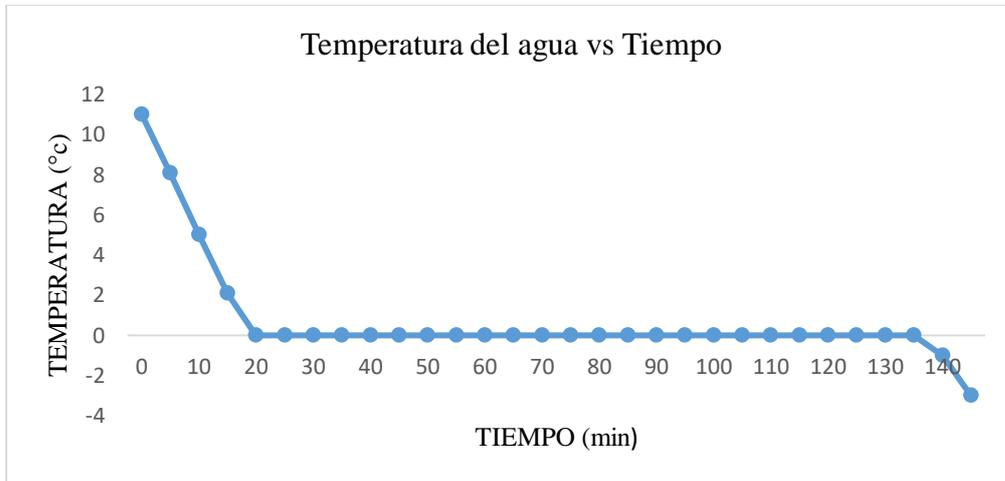
Realizado por: Autores

El rango de temperatura con el que trabaja la salmuera esta entre -7°C y -10°C, esto con finalidad de mantener un diferencial de temperatura alto, es decir mayor o igual a -4°C que es lo que

recomienda ASHRAE, además se mantiene un control permanente de la presión con la que trabaja la bomba ya que cuando la temperatura de la salmuera está cercana a  $-10^{\circ}\text{C}$  se produce un incremento que indica un posible congelamiento del rodete de la misma.

#### 4.1.1. Tiempo de congelación del agua prueba 1

El agua en la pista disminuye su temperatura hasta comenzar el cambio de fase que es proceso más largo, una vez que cambia de fase la temperatura del hielo disminuye rápidamente, en el gráfico 1-4 se observa el comportamiento del agua en el prototipo:



**Gráfico 1-4.** Curva temperatura del agua vs tiempo para salmuera  $\text{CaCl}_2$  21%

Fuente: Autores

En el gráfico 1-4 se observa en un primer tramo un descenso de la temperatura del agua hasta alcanzar los  $0^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 20 minutos, luego empieza el cambio de fase para lo cual es necesario un tiempo de 115 minutos hasta formar una capa de hielo de 1 centímetro de espesor, transcurrido este tiempo la superficie de la pista baja su temperatura hasta  $-3$  grados centígrados compactando totalmente la capa de hielo.

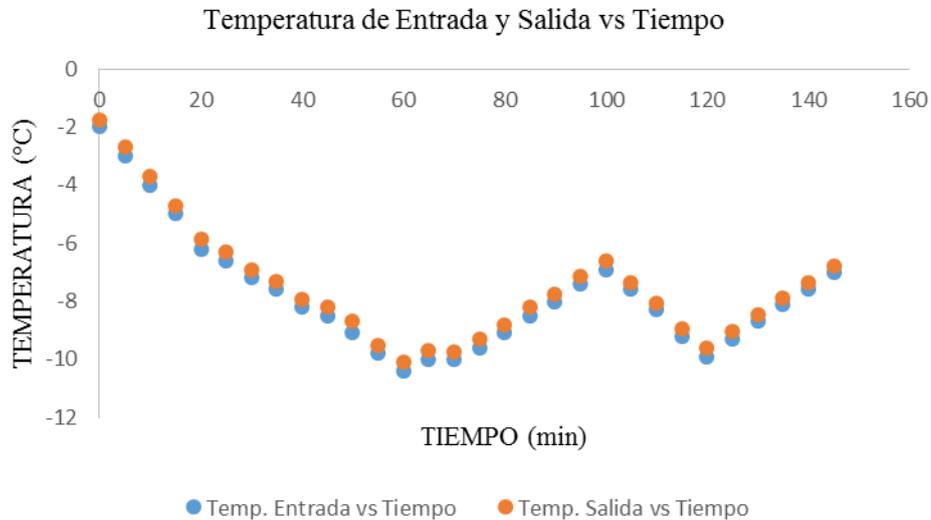


**Figura 1-4.** Formación del hielo Cloruro de Calcio 21%

Fuente: Autores

#### 4.1.2. Temperatura de la salmuera vs tiempo prueba 1

La salmuera a la entrada y la salida del prototipo presenta un incremento en su temperatura el cual presenta pequeñas variaciones a lo largo de la prueba, en el gráfico 2-4 se observa el comportamiento de la salmuera a la entrada y la salida del serpentín.

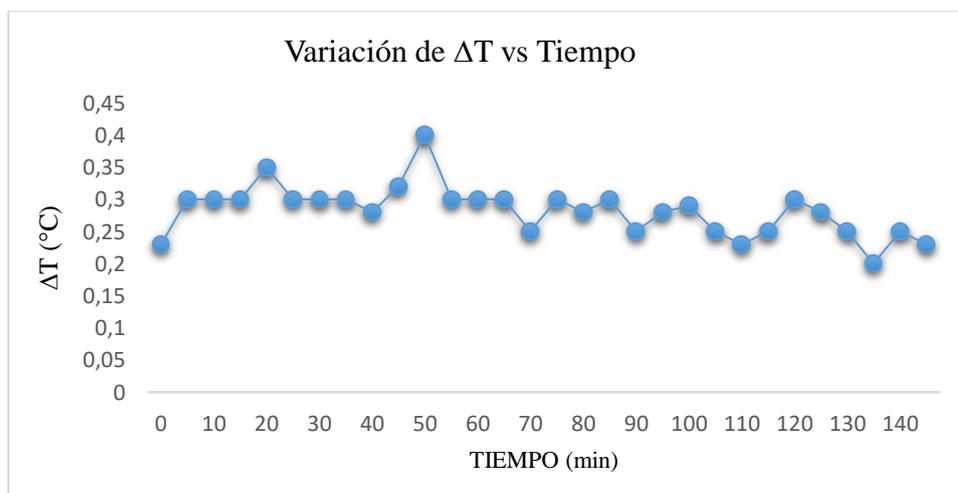


**Gráfico 2-4.** Temperaturas de entrada y salida de la salmuera CaCl<sub>2</sub> 21%

Fuente: Autores

Como se observa en el gráfico 2-4 la salmuera de Cloruro de Calcio al 21% oscila entre una temperatura de -10 a -6 grados centígrados. También se puede observar que la temperatura de salida del prototipo es mayor que la temperatura de entrada esto es debido a que la salmuera absorbe calor del agua de la pista para formar la capa de hielo.

En el gráfico 3-4, se observa la variación del diferencial de temperatura de la salmuera en función del tiempo:



**Gráfico 3-4.** Variación de  $\Delta T$  vs tiempo salmuera CaCl<sub>2</sub> 21%

Fuente: Autores

La figura 3-4 muestra que el delta temperatura no permanece constante y la variación máxima de temperatura es 0.4 grados centígrados donde hay una mayor transferencia de calor. El delta de temperatura promedio en el proceso de formación de hielo es de 0.3 grados centígrados.

Canto mayor es la formación de hielo el delta de temperatura es menor, llegando a su pico más bajo de 0,2 grados centígrados.

#### 4.2. Prueba 2. Salmuera Cloruro de Calcio al 15%

En esta prueba se comienza con la circulación de la salmuera por la tubería de la pista desde los -2,5 grados centígrados hasta los -8 grados centígrados que es el punto en el cual el sistema empieza a presentar problemas de congelamiento en el evaporador, de igual manera para obtener la composición del Cloruro de Calcio al 15% se debe añadir un volumen extra de agua en la salmuera anterior, este volumen se obtiene mediante la expresión:

$$15\% = \frac{V_{extra}}{V_{extra} + V_{agua}} * 100\% \quad (33)$$

Donde:

$V_{extra}$ : Volumen extra de agua

$V_{agua}$ : Volumen de agua

$$15\% = \frac{V_{extra}}{V_{extra} + 172.2 \text{ ltr}} * 100\%$$

$$15\%(V_{extra} + 172.2 \text{ ltr}) = V_{extra} * 100\%$$

$$V_{extra} = \frac{15 * (172.2 \text{ ltr})}{(100 - 15)}$$

$$V_{extra} = 30.88 \text{ ltr}$$

De acuerdo con los resultados obtenidos es necesario añadir 30.88 litros de agua a la salmuera para bajar la concentración al 15%, después de obtener una mezcla homogénea se debe retirar la misma cantidad de salmuera con el fin de trabajar con un volumen total de 218 litros.

Para la prueba 2 se toman las siguientes consideraciones:

Fecha: 21 de junio de 2019

Hora: 10:00 AM

Temperatura ambiente 12 °C

Temperatura del agua 10,3 °C

**Tabla 2-4.** Resultados prueba experimental con Cloruro de Calcio al 15%

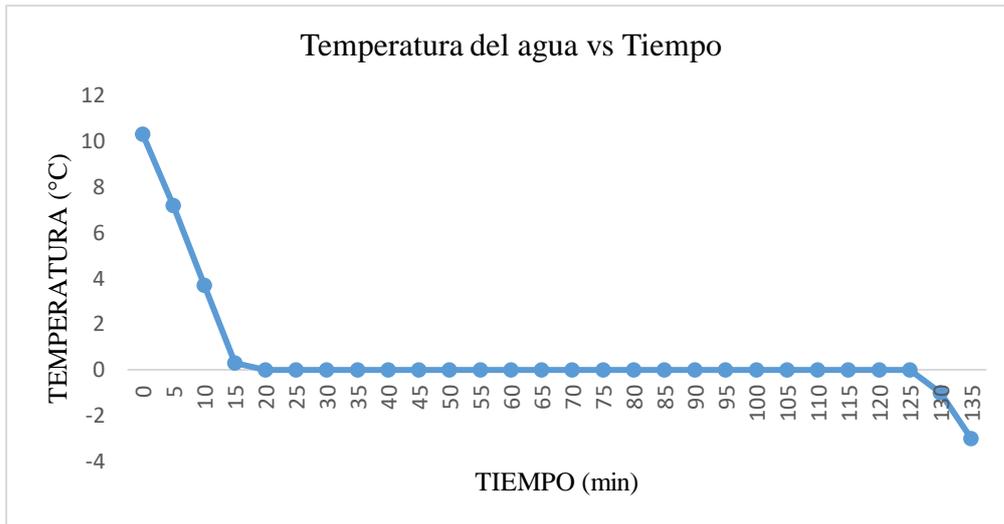
Tiempo (minutos)	Caudal (l/min)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)	Delta T (°C)	Presión (psi)	Temperatura del agua (°C)
0	35,1	-2,5	-1,95	0,55	40	10,3
5	35,1	-2,8	-2,10	0,70	40	7,2
10	35,1	-3,4	-2,90	0,50	40	3,7
15	35,1	-4,0	-3,40	0,60	40	0,3
20	35,1	-4,6	-4,20	0,40	40	0
25	35,1	-5,1	-4,60	0,50	45	0
30	35,1	-5,7	-5,35	0,35	45	0
35	35,1	-6,2	-5,90	0,30	45	0
40	35,1	-6,4	-5,85	0,55	45	0
45	35,0	-6,8	-6,23	0,57	45	0
50	34,6	-7,2	-6,80	0,40	45	0
55	34,2	-7,6	-7,15	0,45	45	0
60	34,0	-8,0	-7,44	0,56	60	0
65	34,0	-8,0	-7,32	0,68	60	0
70	34,0	-8,0	-7,40	0,60	60	0
75	34,4	-7,4	-6,90	0,50	60	0
80	34,0	-7,0	-6,55	0,45	60	0
85	34,8	-6,4	-6,05	0,35	45	0
90	35,1	-6,0	-5,55	0,45	45	0
95	35,1	-7,0	-6,55	0,45	45	0
100	34,8	-7,5	-7,08	0,42	60	0
105	34,0	-8,0	-7,56	0,44	60	0
110	34,0	-8,3	-7,80	0,50	60	0
115	34,5	-7,7	-7,15	0,55	60	0
120	35,1	-7,2	-6,60	0,60	45	0
125	35,1	-7,0	-6,50	0,50	45	0
130	35,1	-6,6	-6,20	0,40	45	-1
135	35,1	-6,1	-5,70	0,40	45	-3

Realizado por: Autores

Se observa que la velocidad de formación de hielo es mayor que en la concentración del 15%, también existe una variación en el caudal con referencia a la prueba 1; al igual que en la prueba 1, cuando la temperatura de la salmuera llega al límite que puede entregar el equipo se presenta un incremento en la presión por lo cual se evita llegar a ese punto de funcionamiento.

#### **4.2.1. Tiempo de congelación del agua prueba 2**

En el gráfico 4-4 se puede observar como ocurre la disminución de la temperatura del agua hasta la temperatura en la cual se produce el cambio de fase en toda su superficie.



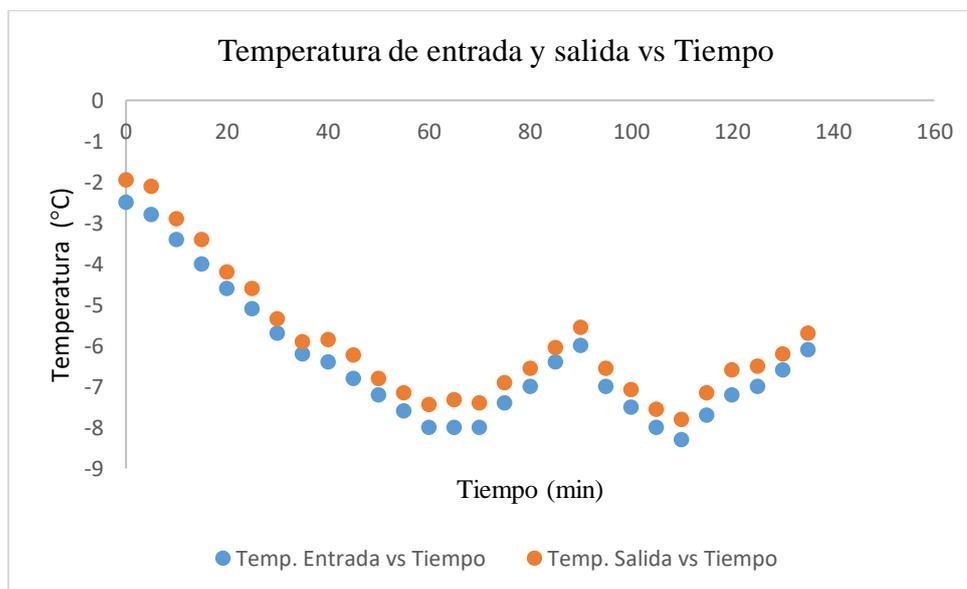
**Gráfico 4-4.** Curva temperatura del agua vs tiempo salmuera CaCl<sub>2</sub> 15%

Fuente: Autores

En el gráfico 4-4 se observa en un primer tramo un descenso de la temperatura del agua hasta alcanzar los 0 °C en un tiempo de 15 minutos, luego empieza el cambio de fase para lo cual es necesario un tiempo de 110 minutos hasta formar una capa de hielo de 1 centímetro de espesor, transcurrido este tiempo la superficie de la pista baja su temperatura hasta -3 grados centígrados compactando totalmente la capa de hielo.

#### 4.2.2. Temperatura de la salmuera vs tiempo prueba 2

En el gráfico 5-4 se observa el comportamiento de la salmuera a la entrada y la salida del serpentín.

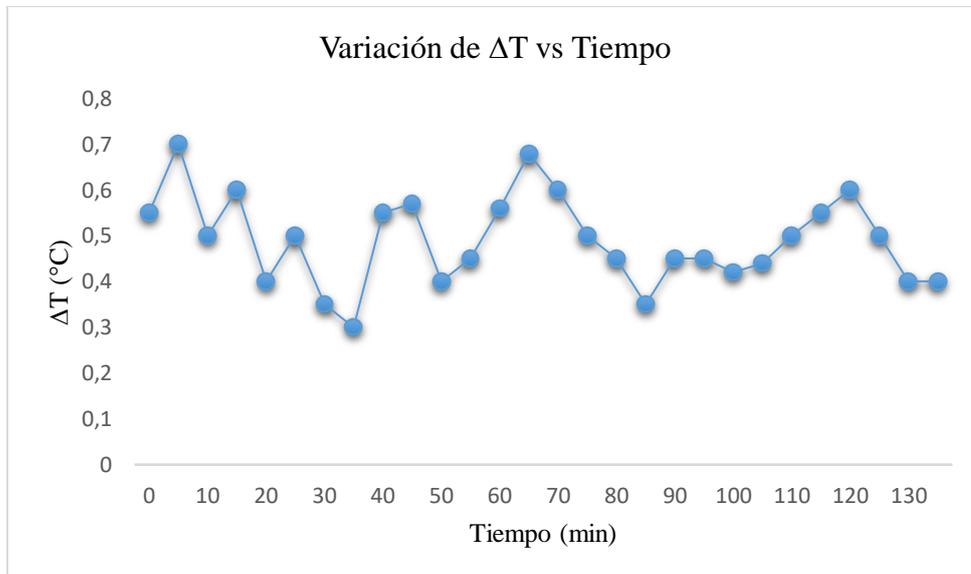


**Gráfico 5-4.** Temperaturas de entrada y salida de la salmuera CaCl<sub>2</sub> 15%

Fuente: Autores

Como se puede observar en el gráfico 5-4 la salmuera de Cloruro de Calcio al 15% oscila entre una temperatura de -8 a -5.5 grados centígrados. También se puede observar que la temperatura de salida del prototipo es mayor que la temperatura de entrada y el delta temperatura es mayor.

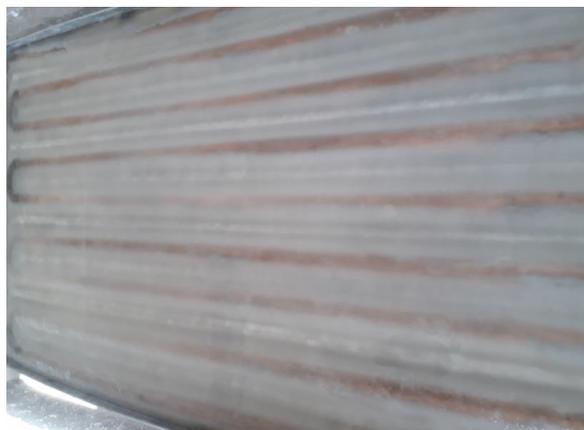
En el gráfico 6-4, se observa la variación de temperatura de la salmuera en función del tiempo:



**Gráfico 6-4.** Variación de  $\Delta T$  vs tiempo salmuera  $\text{CaCl}_2$  15%

Fuente: Autores

La figura 6-4 muestra que el delta temperatura no permanece constante y la variación máxima de temperatura es 0.7 grados centígrados donde hay una mayor transferencia de calor. El delta de temperatura promedio en el proceso de formación de hielo es de 0.45 grados centígrados. Canto mayor es la formación de hielo el delta de temperatura es menor llegando a su pico más bajo de 0.3 grados centígrados



**Figura 2-4.** Formación del hielo Cloruro de Calcio 15%

Fuente: Autores

### 4.3. Prueba 3. Salmuera Propilenglicol al 30%

Para realizar esta prueba se hace fluir la salmuera por la tubería de la pista desde una temperatura de -0.5 grados centígrados enfriándola hasta -10 grados centígrados momento en que el chiller ya no puede bajar más la temperatura, además se realiza el cálculo para la preparación de la concentración de Propilenglicol al 30% mediante la siguiente ecuación:

$$V_{soluta} = \frac{V_T * 30\%}{100\%} \quad (34)$$

Donde:

$V_{soluta}$ : Volumen de Propilenglicol

$V_T$ : Volumen de la salmuera

$$V_{soluta} = \frac{218 \text{ ltr} * 30\%}{100\%}$$

$$V_{soluta} = 65.4 \text{ ltr}$$

El volumen total de agua que se necesita para la formación de la salmuera de Propilenglicol al 30% de concentración se lo obtiene restando el volumen del soluto del volumen total requerido que es de 218 litros de la siguiente manera:

$$V_{total} = V_{agua} + V_{propilenglicol}$$

$$V_{agua} = V_{total} - V_{propilenglicol}$$

$$V_{agua} = 218 \text{ ltr} - 65.4 \text{ ltr}$$

$$V_{agua} = 152.6 \text{ ltr}$$

De acuerdo con los cálculos para obtener una salmuera con una concentración del 30% se necesita 152.6 litros de agua y 65.4 litros de Propilenglicol.

Para la prueba 3 se tomaron las siguientes consideraciones:

Fecha: 24 de junio del 2019

Hora de inicio de la prueba: 10:40 AM

Temperatura Ambiente: 14 °C

Temperatura inicial del agua: 11 °C

**Tabla 3-4.** Resultados prueba experimental con Propilenglicol 30%

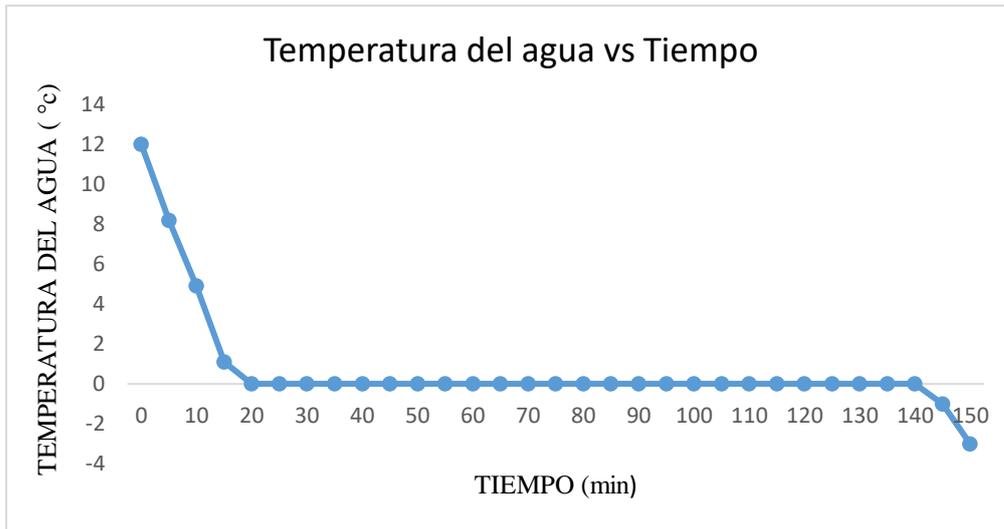
Tiempo (minutos)	Caudal (litr/min)	Temp. de entrada (°C)	Temp. de salida (°C)	Delta T (°C)	Presión (psi)	Temp. del agua (°C)
0	35	-0,5	-0,2	0,3	30	12
5	35	-1,5	-1,25	0,25	30	8,2
10	35	-1,7	-1,48	0,22	30	4,9
15	35	-1,9	-1,64	0,26	30	1,1
20	35	-2,4	-2,10	0,30	30	0
25	35	-1,9	-1,58	0,32	30	0
30	35	-2,7	-2,35	0,35	30	0
35	35	-3,4	-3,00	0,40	30	0
40	35	-3,9	-3,52	0,38	30	0
45	35	-4,5	-4,16	0,34	30	0
50	35	-5,0	-4,60	0,40	30	0
55	35	-5,6	-5,15	0,45	30	0
60	35	-6,1	-5,75	0,35	30	0
65	35	-6,7	-6,40	0,30	30	0
70	35	-7,2	-6,93	0,27	30	0
75	35	-7,8	-7,52	0,28	30	0
80	35	-8,1	-7,83	0,27	30	0
85	35	-8,6	-8,33	0,27	30	0
90	34,6	-9,3	-9,00	0,30	40	0
95	34,6	-9,5	-9,17	0,33	40	0
100	34,3	-9,9	-9,50	0,40	60	0
105	34,3	-10,0	-9,60	0,40	60	0
110	34,6	-9,7	-9,30	0,40	60	0
115	34,6	-9,0	-8,67	0,33	40	0
120	35	-8,4	-8,00	0,40	40	0
125	35	-8,1	-7,75	0,35	40	0
130	35	-7,6	-7,30	0,30	30	0
135	35	-7,3	-7,00	0,30	30	0
140	35	-6,6	-6,26	0,34	30	0
145	35	-6,4	-6,72	-0,32	30	-1
150	35	-6,0	-6,30	-0,30	30	-3

Realizado por: Autores

Como se puede observar la formación de una capa estable de hielo de 1 centímetro de altura con esta concentración de Propilenglicol tardo una hora con cincuenta minutos, la presión y el caudal se mantuvieron estables hasta alcanzar la temperatura de -10 grados centígrados.

#### 4.3.1. *Tiempo de congelación del agua prueba 3*

En el gráfico 7-4 se puede observar el comportamiento del agua en el prototipo:



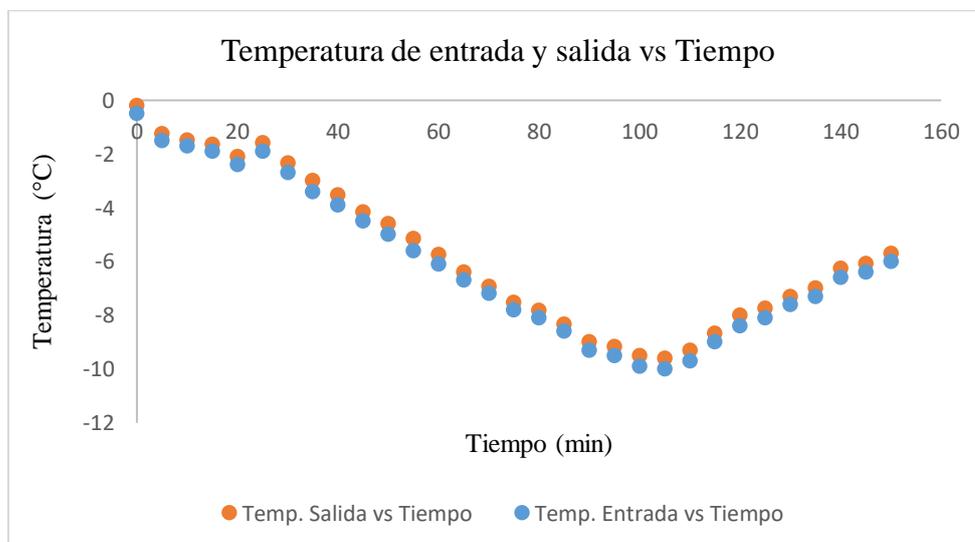
**Gráfico 7-4.** Curva temperatura del agua vs tiempo para salmuera CaCl<sub>2</sub> 30%

Fuente: Autores

En el gráfico 7-4 se puede observar en un primer tramo un descenso de la temperatura del agua hasta alcanzar los 0 grados centígrados en un tiempo de 20 minutos, luego empieza el cambio de fase para lo cual es necesario un tiempo de 120 minutos hasta formar una capa de hielo de 1 centímetro de espesor, trascurrido este tiempo la superficie de la pista baja su temperatura hasta -3 grados centígrados compactando totalmente la capa de hielo.

#### 4.3.2. Temperatura de la salmuera vs tiempo prueba 3

En el gráfico 8-4 se observa el comportamiento de la salmuera a la entrada y la salida del serpentín.

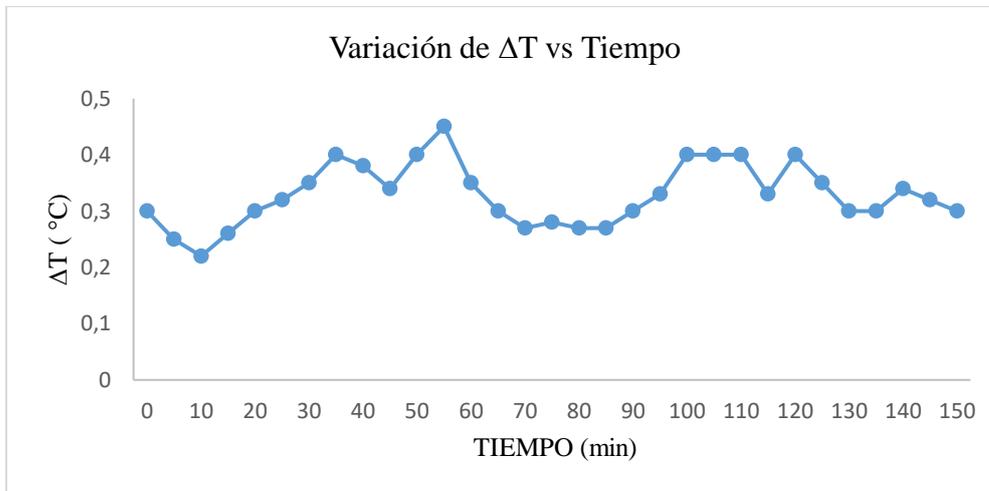


**Gráfico 8-4.** Temperaturas de entrada y salida de la salmuera Propilenglicol 30%

Fuente: Autores

Como se puede observar en el gráfico 8-4 la salmuera de Propilenglicol al 30% oscila entre una temperatura de -10 a -6 grados centígrados. También se puede observar que el delta de temperatura es bajo y por lo tanto la transferencia de calor es menor.

En el gráfico 9-4, se observa la variación de temperatura de la salmuera en función del tiempo:



**Gráfico 9-4.** Variación de  $\Delta T$  vs tiempo salmuera Propilenglicol 30%

**Fuente:** Autores

La figura 9-4 muestra que el delta temperatura no permanece constante y la variación máxima de temperatura es 0,45 grados centígrados donde hay una mayor transferencia de calor. El delta de temperatura promedio en el proceso de formación de hielo es de 0,3 grados centígrados. Cuanto mayor es la formación de hielo el delta de temperatura es menor llegando a su pico más bajo de 0,2 grados centígrados.



**Figura 3-4.** Formación del hielo Propilenglicol 30%

**Fuente:** Autores

#### 4.4. Prueba 4. Salmuera Propilenglicol al 21%

Para esta prueba se hace fluir la salmuera por la tubería de la pista desde -1 grado centígrado hasta -7 grados centígrados, a esta temperatura empezó a existir problemas de congelamiento subiendo la presión de la bomba.

Para obtener una concentración del 21% se debe obtener la cantidad de agua extra que se debe añadir a la solución anterior con la siguiente expresión:

$$21\% = \frac{V_{extra}}{V_{extra} + V_{agua}} * 100\%$$

Donde:

$V_{extra}$ : Volumen extra de agua

$V_{agua}$ : Volumen de agua

$$21\% = \frac{V_{extra}}{V_{extra} + 152.6 \text{ ltr}} * 100\%$$

$$21\%(V_{extra} + 152,6 \text{ ltr}) = V_{extra} * 100\%$$

$$V_{extra} = \frac{21 * (152,6 \text{ ltr})}{(100 - 21)}$$

$$V_{extra} = 40,56 \text{ ltr}$$

Para obtener una salmuera con una concentración del 21% se debe añadir un volumen extra de agua de 40,56 litros de agua hasta obtener una mezcla homogénea, luego de obtener la mezcla homogénea se debe retirar el mismo volumen de salmuera con el fin de trabajar con el mismo volumen de solución

Para la prueba 4 se tomaron las siguientes consideraciones:

Fecha: 25 de junio del 2019

Hora de inicio de la prueba: 10:40 AM

Temperatura Ambiente: 13 °C

Temperatura inicial del agua: 10 °C

**Tabla 4-4.** Resultados prueba experimental con Propilenglicol al 21%

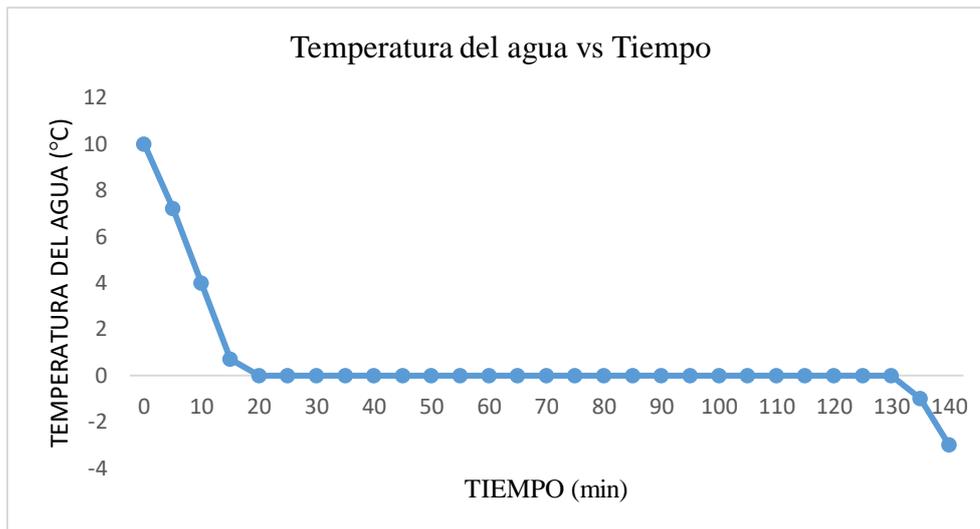
Tiempo (minutos)	Caudal (ltr/min)	Temp. de entrada (°C)	Temp. de salida (°C)	Delta T (°C)	Presión (psi)	Temp. del agua (°C)
0	35,1	-1,0	-0,72	0,28	30	10
5	35,1	-2,0	-1,60	0,40	30	7,2
10	35,1	-2,7	-2,35	0,35	30	4
15	35,1	-3,3	-3,00	0,30	30	0,7
20	35,1	-4,0	-3,70	0,30	30	0
25	35,1	-4,7	-4,38	0,32	30	0
30	35,1	-5,3	-5,00	0,30	40	0
35	35,1	-5,9	-5,52	0,38	40	0
40	33,9	-6,5	-6,20	0,30	40	0
45	33,4	-7,1	-6,85	0,25	60	0
50	33,7	-6,0	-5,72	0,28	40	0
55	35,1	-5,4	-5,04	0,36	40	0
60	35,1	-4,9	-4,65	0,25	40	0
65	35,1	-4,1	-3,86	0,24	30	0
70	35,1	-5,0	-4,79	0,21	30	0
75	35,1	-5,6	-5,33	0,27	30	0
80	35,1	-6,0	-5,70	0,30	30	0
85	34,4	-6,6	-6,25	0,35	40	0
90	33,7	-7,2	-6,84	0,36	60	0
95	34,6	-6,5	-6,10	0,40	40	0
100	35,1	-5,9	-5,65	0,25	40	0
105	35,1	-5,3	-4,94	0,36	30	0
110	35,1	-4,7	-4,46	0,24	30	0
115	35,1	-4,1	-3,75	0,35	30	0
120	35,1	-3,5	-3,20	0,30	30	0
125	35,1	-4,2	-3,95	0,25	30	0
130	35,1	-4,8	-4,60	0,20	30	0
135	35,1	-5,4	-5,20	0,20	40	-1
140	35,1	-6,1	-5,80	0,30	40	-3

Realizado por: Autores

Como se observa después de que el agua de la pista llega a 0 grados centígrados y comienza el cambio de fase tarda aproximadamente 140 minutos en formarse una masa compacta de hielo, se observa que el tiempo de formado de hielo es más alto debido a las temperaturas a las que se encuentra la salmuera.

#### 4.4.1. *Tiempo de congelación del agua prueba 4*

En el gráfico 10-4 se puede observar el comportamiento del agua en el prototipo:



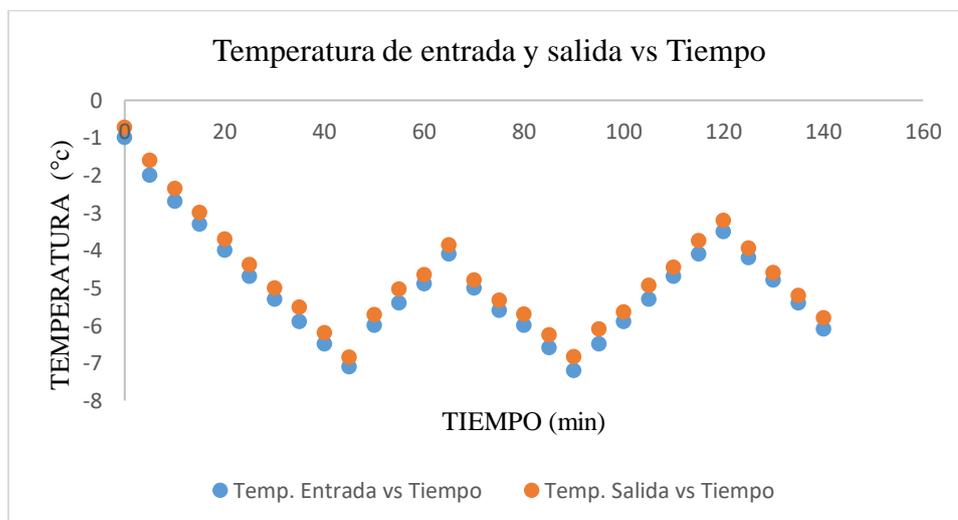
**Gráfico 10-4.** Curva temperatura del agua vs tiempo para salmuera Propilenglicol 21%

Fuente: Autores

En el gráfico 10-4 se puede observar en un primer tramo un descenso de la temperatura del agua hasta alcanzar los 0 °C en un tiempo de 20 minutos, luego empieza el cambio de fase para lo cual es necesario un tiempo de 110 minutos hasta formar una capa de hielo de 1 centímetro de espesor, transcurrido este tiempo la superficie de la pista baja su temperatura hasta -3 grados centígrados compactando totalmente la capa de hielo.

#### 4.4.2. Temperatura de la salmuera vs tiempo prueba 4

En el gráfico 11-4 se puede observar el comportamiento de la salmuera a la entrada y la salida del serpentín.

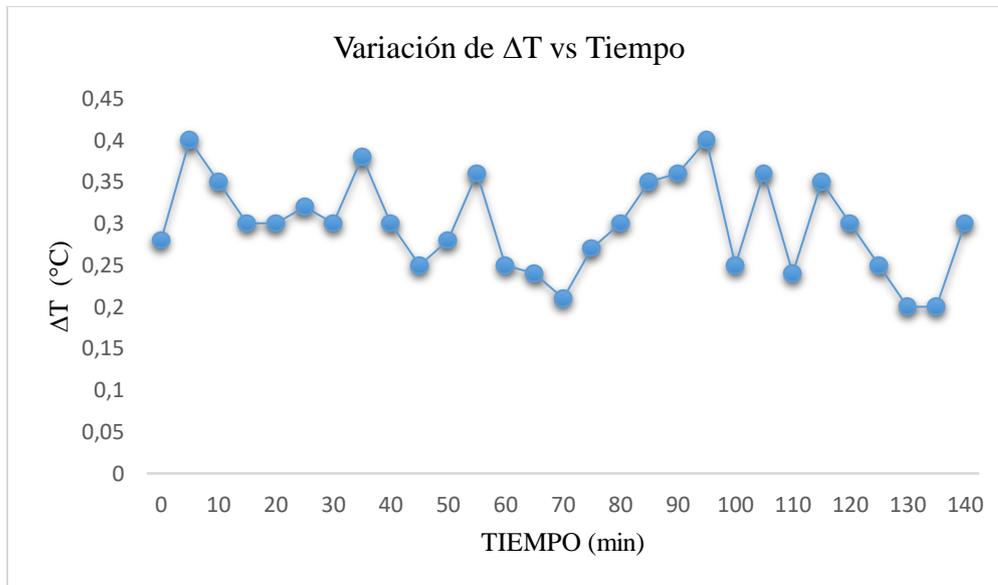


**Gráfico 11-4.** Temperaturas de entrada y salida de la salmuera Propilenglicol 21%

Fuente: Autores

Como se puede observar en el gráfico 11-4 la salmuera de Propilenglicol al 21% oscila entre una temperatura de -7 a -3 grados centígrados. También se puede observar que el delta de temperatura es bajo y por lo tanto la transferencia de calor es menor.

En el gráfico 12-4, se observa la variación de temperatura de la salmuera en función del tiempo:



**Gráfico 12-4.** Variación de  $\Delta T$  vs tiempo salmuera Propilenglicol 21%

Fuente: Autores

La figura 12-4 muestra que el delta temperatura no permanece constante y la variación máxima de temperatura es 0,4 grados centígrados donde hay una mayor transferencia de calor. El delta de temperatura promedio en el proceso de formación de hielo es de 0,3 grados centígrados. Mientras mayor es la formación de hielo el delta de temperatura es menor llegando a su pico más bajo de 0,2 grados centígrados

#### 4.5. Consumo energético

Para determinar el consumo energético presente en cada prueba, se toma los datos del chiller, así como los del sistema de bombeo, la energía consumida por el chiller está en relación con el voltaje y la corriente que consume el equipo durante su tiempo de funcionamiento, para lo cual se toma los datos técnicos de diseño del chiller que se detallan en la tabla 5-4,

**Tabla 5-4.** Datos energéticos equipo chiller

Voltaje	220 V
Corriente	10,1 A
Factor de potencia	70%

Realizado por: Autores

Fuente: (Guaman & Muñoz, 2017, p. 102)

La potencia consumida por el chiller está en función de la siguiente expresión:

$$P = V * I * FP \quad (35)$$

Donde:

Pc: Potencia consumida por el chiller [W]

V: Voltaje de operación [V]

I: Corriente [A]

FP: Factor de potencia

$$Pc = 220 V * 10,1 A * 0,70$$

$$Pc = 1555,40 W$$

La potencia consumida de la bomba se obtiene mediante la expresión:

$$Pb = \frac{\rho * g * Q * H}{n_g} \quad (36)$$

Donde:

Pb: Potencia consumida [W]

$\rho$ : Densidad [ $\frac{Kg}{m^3}$ ]

Q: Caudal [ $\frac{m^3}{s}$ ]

H: Altura dinámica de la bomba [m]

$n_g$ : Rendimiento global

La bomba *PLURIJETm 4/100-N* cumple con las especificaciones de alta eficiencia en concordancia con la IEC 60034-30-1 (PEDROLLO, 2019, p. 1), por lo cual se obtiene su rendimiento global del ANEXO G siendo éste del 77,4 %, así como los datos de caudal y altura dinámica serán el promedio de los datos tomados en las tablas resultantes de cada etapa experimental.

#### **4.5.1. Consumo energético prueba 1 Cloruro de Calcio 21%**

Para la prueba con la salmuera de Cloruro de Calcio al 21% el tiempo de funcionamiento del chiller dese el inicio de la prueba hasta alcanzar la temperatura de -2 °C cuando circula por el serpentín fue de 45 minutos, y el tiempo de formación del hielo fue de 145 minutos, dando un tiempo total de la prueba de 190 minutos, por lo que la energía consumida por el chiller está dada por:

$$Ec_1 = 1555,40 W * 190 \text{ min}$$

$$Ec_1 = 1555,40 W * 11400seg$$

$$Ec_1 = 17731,56 KJ$$

La energía consumida por la bomba durante la experimentación está dada por el caudal y la presión promedio, además del rendimiento de la bomba que se detallan en la tabla:

**Tabla 6-4.** Caudal y altura promedio prueba 1

Caudal promedio	0,0005707 $\frac{m^3}{s}$
Altura promedio	25,75 mca
Densidad	1190 $\frac{Kg}{m^3}$
Tiempo de prueba	190 min

Realizado por: Autores

La energía consumida por la bomba en la prueba 1 es igual a:

$$Pb_1 = \frac{(1190) * (9,81) * (0,0005707) * (25,75)}{0,774}$$

$$Pb_1 = 221,64 W$$

$$Eb_1 = 221,64 W * 11400 seg$$

$$Eb_1 = 2526,765 KJ$$

Consumo energético total para la prueba 1 es la suma del consumo del chiller y el consumo de la bomba

$$Et_1 = Ec_1 + Eb_1$$

$$Et_1 = 17731,56 KJ + 2526,765 KJ$$

$$Et_1 = 20258,325 KJ$$

#### 4.5.2. Consumo energético prueba 2 Cloruro de Calcio 15 %

Para la prueba con la salmuera de Cloruro de Calcio al 15% el tiempo de funcionamiento del chiller desde el inicio de la prueba hasta alcanzar la temperatura de -2,5 °C cuando circula por el serpentín fue de 40 minutos, y el tiempo de formación del hielo fue de 135 minutos, dando un tiempo total de la prueba de 175 minutos, por lo que la energía consumida por el chiller está dada por:

$$Ec_2 = 1555,40 W * 175min$$

$$Ec_2 = 1555,40 W * 10500seg$$

$$Ec_2 = 16331,70 \text{ KJ}$$

La energía consumida por la bomba durante la experimentación está dada por el caudal y la presión promedio, además del rendimiento de la bomba que se detallan en la tabla:

**Tabla 7-4.** Caudal y altura promedio prueba 2

Caudal promedio	$0,000579 \frac{m^3}{s}$
Altura promedio	34.418 mca
Densidad	$1140 \frac{Kg}{m^3}$
Tiempo de prueba	175 min

Realizado por: Autores

La energía consumida por la bomba en la prueba 2 es igual a:

$$Pb_2 = \frac{(1140) * (9,81) * (0,000579) * (34,418)}{0,774}$$

$$Pb_2 = 287,936 \text{ W}$$

$$Eb_2 = 287,963 \text{ W} * 10500 \text{ seg}$$

$$Eb_2 = 3023,335 \text{ KJ}$$

Consumo energético total para la prueba 2 es la suma del consumo del chiller y el consumo de la bomba

$$Et_2 = Ec_2 + Eb_2$$

$$Et_2 = 16331,70 \text{ KJ} + 3023,335 \text{ KJ}$$

$$Et_2 = 19355,035 \text{ KJ}$$

#### 4.5.3. Consumo energético prueba 3 Propilenglicol 30%

Para la prueba con la salmuera de Propilenglicol al 30% el tiempo de funcionamiento del chiller dese el inicio de la prueba hasta alcanzar la temperatura de  $-0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  cuando circula por el serpentín fue de 60 minutos, y el tiempo de formación del hielo fue de 150 minutos, dando un tiempo total de la prueba de 210 minutos, por lo que la energía consumida por el chiller está dada por:

$$Ec_3 = 1555,40 \text{ W} * 210 \text{ min}$$

$$Ec_3 = 1555,40 \text{ W} * 12600 \text{ seg}$$

$$Ec_3 = 19598,04 \text{ KJ}$$

La energía consumida por la bomba durante la experimentación está dada por el caudal y la presión promedio, además del rendimiento de la bomba que se detallan en la tabla:

**Tabla 8-4.** Caudal y altura promedio prueba 3

Caudal promedio	$0,000582 \frac{m^3}{s}$
Altura promedio	24,284 mca
Densidad	$1037,81 \frac{Kg}{m^3}$
Tiempo de prueba	210 min

Realizado por: Autores

La energía consumida por la bomba en la prueba 3 es igual a:

$$Pb_3 = \frac{(1037,81) * (9,81) * (0,000582) * (24,284)}{0,774}$$

$$Pb_3 = 185,90 W$$

$$Eb_3 = 185,90 W * 12600seg$$

$$Eb_3 = 2342,39KJ$$

Consumo energético total para la prueba 3 es la suma del consumo del chiller y el consumo de la bomba

$$Et_3 = Ec_3 + Eb_3$$

$$Et_3 = 19598,04 KJ + 2342,39 KJ$$

$$Et_3 = 21940,43 K J$$

#### 4.5.4. Consumo energético prueba 4 Propilenglicol 21%

Para la prueba con la salmuera de Propilenglicol al 21% el tiempo de funcionamiento del chiller dese el inicio de la prueba hasta alcanzar la temperatura de -1 °C cuando circula por el serpentín fue de 50 minutos, y el tiempo de formación del hielo fue de 140 minutos, dando un tiempo total de la prueba de 190 minutos, por lo que la energía consumida por el chiller está dada por:

$$Ec_4 = 1555,40 W * 190min$$

$$Ec_4 = 1555,40 W * 11400seg$$

$$Ec_4 = 17731,56 KJ$$

La energía consumida por la bomba durante la experimentación está dada por el caudal y la presión promedio, además del rendimiento de la bomba que se detallan en la tabla:

**Tabla 9-4.** Caudal y altura promedio prueba 4

Caudal promedio	0,00058 $\frac{m^3}{s}$
Altura promedio	25,23 mca
Densidad	1028,20 $\frac{Kg}{m^3}$
Tiempo de prueba	190 min

Realizado por: Autores

La energía consumida por la bomba en la prueba 4 es igual a:

$$Pb_4 = \frac{(1028,20) * (9,81) * (0,00058) * (25,23)}{0,774}$$

$$Pb_4 = 190,70 W$$

$$Eb_4 = 190,70 W * 11400seg$$

$$Eb_4 = 2173,98 KJ$$

Consumo energético total para la prueba 4 es la suma del consumo del chiller y el consumo de la bomba

$$Et_4 = Ec_4 + Eb_4$$

$$Et_4 = 17731,56 KJ + 2173,98 KJ$$

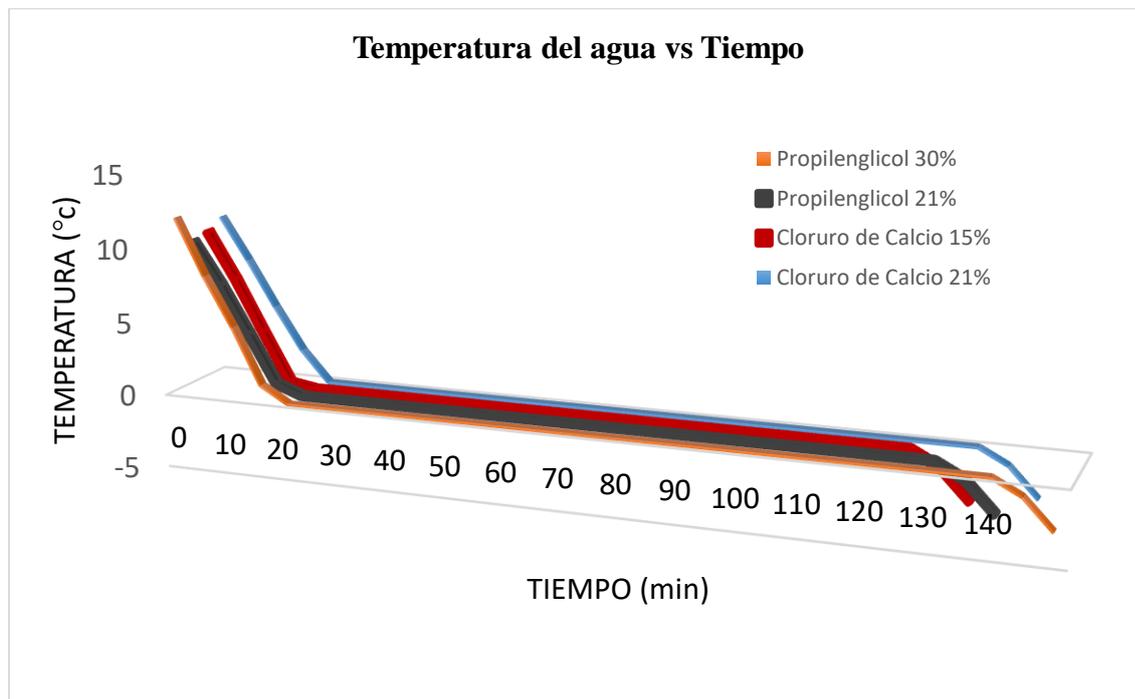
$$Et_4 = 19905,54 KJ$$

#### 4.6. Análisis comparativo de fiabilidad

Para realizar la comparación de fiabilidad entre las distintas salmueras se analizará factores como el consumo energético, los costos de implementación, así como de puesta en marcha, además de otros factores adicionales como la posibilidad de necesitar sistemas adicionales que permitan el adecuado funcionamiento del proceso, esto con la finalidad de determinar la solución más adecuada para este tipo de sistemas.

#### 4.6.1. Análisis comparativo de temperatura del agua vs tiempo

En la gráfica 15-4 se presenta la variación de la temperatura del agua en el prototipo con respecto al tiempo con cada una de las salmueras sometidas a prueba.



**Gráfico 13-4.** Comparación de la temperatura del agua con las diferentes salmueras

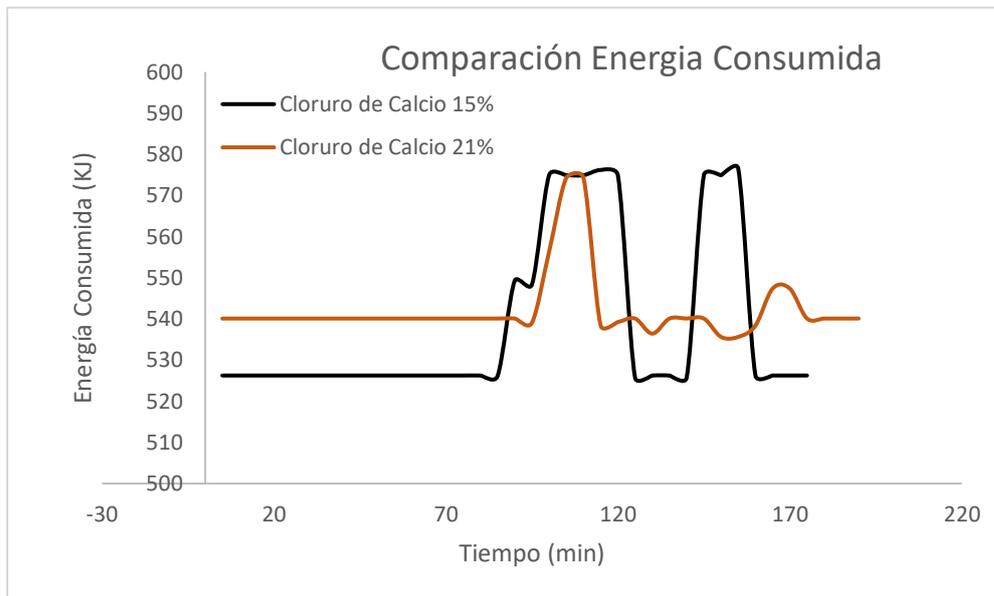
Fuente: Autores

Se puede observar que existe una primera etapa en la cual disminuye la temperatura desde aproximadamente 12 °C hasta los 0 °C en un tiempo cercano a los 20 minutos para cada una de las concentraciones.

Luego se evidencia el proceso de cambio de fase en el cual se forma la capa de hielo, la salmuera de Cloruro de Calcio al 15% tardó 105 minutos siendo ésta la de menor tiempo de todas, a la vez la salmuera de Propilenglicol al 30% es la que toma un mayor tiempo, siendo esta de 120 minutos.

#### 4.6.2. Análisis comparativo de consumo energético

En la gráfica 16-4 se observa la comparación energética de las concentraciones de Cloruro de Calcio a lo largo de las pruebas realizadas:



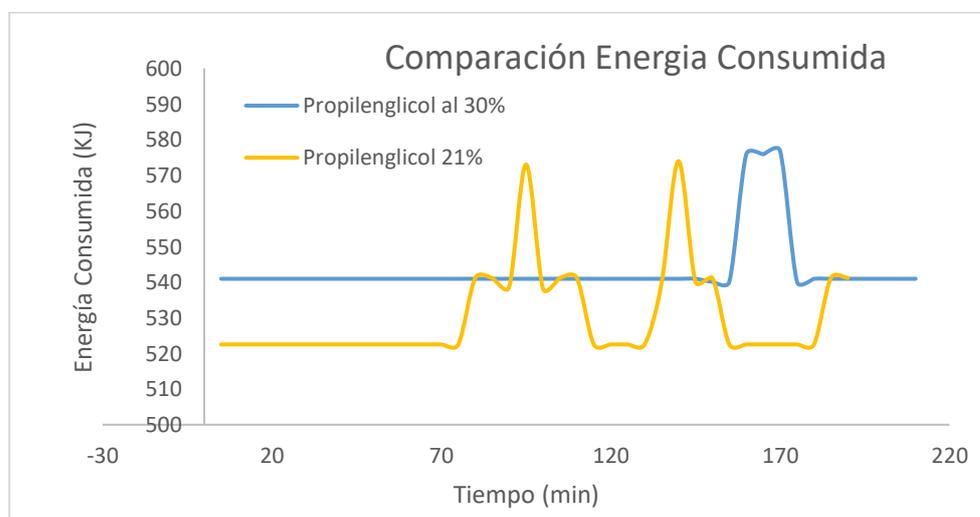
**Gráfico 14-4.** Comparación energía consumida salmueras Cloruro de Calcio

**Fuente:** Autores

La concentración al 15% presenta picos más altos de consumo energético a lo largo de la prueba, pero esto contrasta con el tiempo de duración de la prueba que es menor en comparación con la concentración al 21%.

Los puntos más altos que se observan corresponden al momento en que se incrementa la presión en el sistema de bombeo debido a que el chiller alcanza la temperatura mínima de funcionamiento generando obstrucciones en el sistema e incremento de la potencia consumida.

En la gráfica 17-4 se observa la comparación energética de las concentraciones de Propilenglicol a lo largo de las pruebas realizadas:



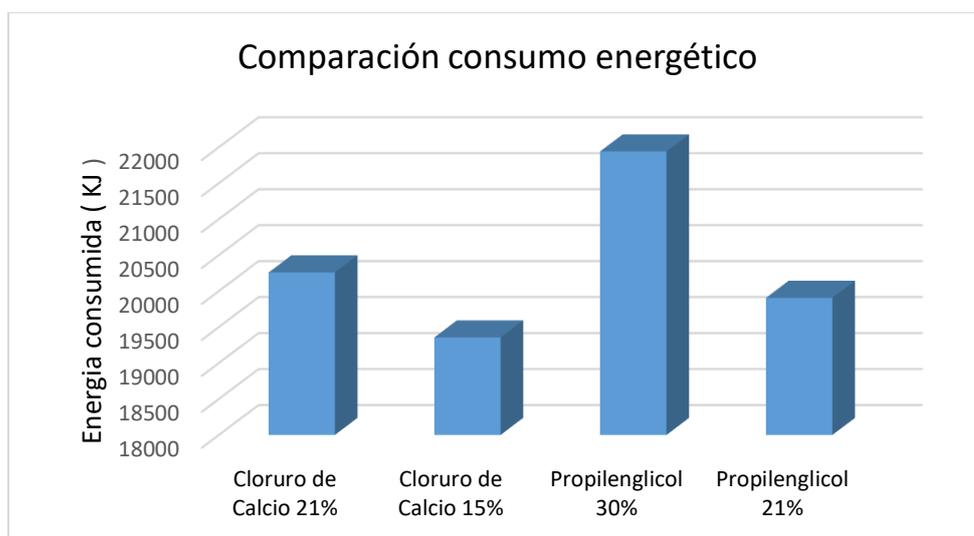
**Gráfico 15-4.** Comparación energía consumida salmueras Propilenglicol

**Fuente:** Autores

La concentración al 21% presenta picos más altos de consumo energético a lo largo de la prueba, pero esto contrasta con el tiempo de duración de la prueba que es menor en comparación con la concentración al 30%.

Los puntos más altos que se observan corresponden al momento en que se incrementa la presión en el sistema de bombeo debido a que la concentración de Propilenglicol al 30% es más densa, además a que el chiller alcanza la temperatura mínima de funcionamiento, generando obstrucciones en el sistema e incremento de la potencia consumida.

Finalmente, el consumo energético calculado en cada una de las pruebas experimentales se representa en el gráfico 18-4, esto nos permite realizar la comparación entre cada una de las soluciones.



**Gráfico 16-4.** Comparación consumo energético de las salmueras

Fuente: Autores

En el gráfico se puede observar que el mayor consumo energético se presenta cuando se trabaja con la salmuera de Propilenglicol al 30%, y el menor consumo con la salmuera de Cloruro de Calcio al 15%, además existe un consumo muy cercano entre las soluciones de Propilenglicol y Cloruro de Calcio al 21%, en cuanto al tiempo de formación de la capa de hielo del prototipo se puede observar no existe una diferencia significativa.

#### 4.6.3. *Análisis de factores adicionales*

Para el análisis de factores adicionales se toma en cuenta gastos que se presentan durante el funcionamiento del sistema, uno de ellos es la corrosión que se genera al utilizar las salmueras de Cloruro de Calcio, las cuales generaron oxidación en las paredes del tanque, además de daños en los empaques y sellos del mismo, generando fugas que pueden ser peligrosas para las personas que se encuentran en el lugar ya que se trata de un producto tóxico que puede generar daños al

estar en contacto con la piel, con los ojos o por inhalación del mismo, en las figuras 4-4 y 5-4 observar el daño generado por las salmueras de Cloruro de Calcio.



**Figura 4-4.** Oxidación en el tanque de salmuera

Fuente: Autores



**Figura 5-4.** Deterioro en sellos y empaques

Fuente: Autores

Otro factor a tomar en cuenta es el tiempo de preparación de la salmuera el cual es mucho menor con el Propilenglicol, ya que el Cloruro de Calcio es un material solido cristalino el cual lleva un tiempo en disolverse en el agua hasta formar la salmuera, además al tener partes solidas estas pueden afectar la estructura interna de la bomba de recirculación, por el contrario el Propilenglicol se encuentra en estado líquido esto facilita la preparación de la salmuera y al no ser corrosiva ni poseer partículas sólidas no pone en riesgo la integridad de la bomba de recirculación.



**Figura 6-4.** Preparación salmuera de Propilenglicol.

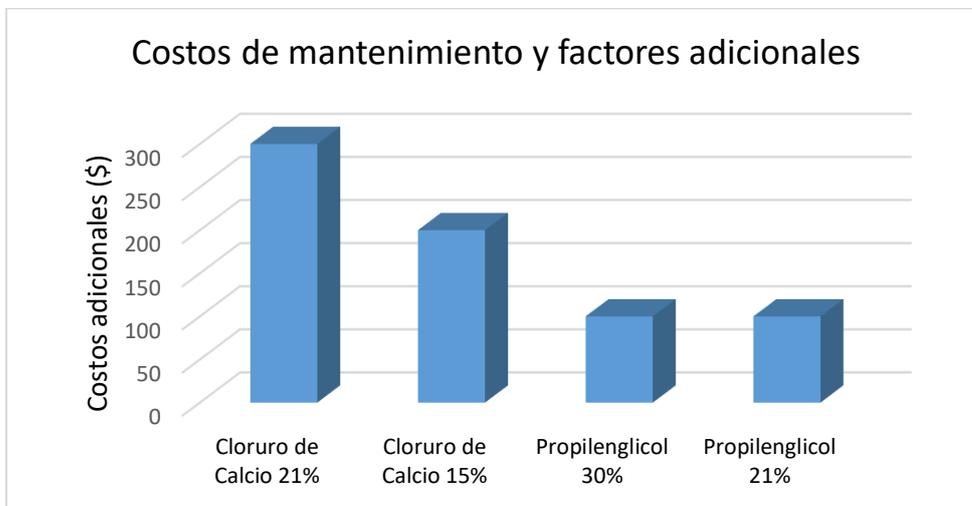
Fuente: Autores



**Figura 7-4.** Preparación salmuera Cloruro de Calcio

Fuente: Autores

Los factores adicionales que aparecen a lo largo del proyecto se los representa en gráfico, para esto se tomaron índices de costos de mantenimiento y sistemas complementarios.



**Gráfico 17-4.** Comparación de costos de mantenimiento y factores adicionales

Fuente: Autores

Para el caso de las salmueras de Cloruro de Calcio se asumen índices mayores de costos de mantenimiento del sistema que en las salmueras de Propilenglicol, esto se debe a los problemas que presentaron en los materiales y equipos estas soluciones, considerando que el mantenimiento corrosivo, así como el reemplazo de empaques, y limpieza del tanque se deben realizar con una frecuencia 2 o 3 veces mayor que con las soluciones de Propilenglicol, además de la dificultad de adquisición del Cloruro de Calcio ya que necesita permisos de la Secretaría Técnica de Drogas SETED, lo cual incrementaría los tiempos de paro, en caso que se necesite sustituir el producto.

#### 4.6.4. Análisis comparativo de costos

Para el análisis de costos en primer lugar se realizará la comparación del costo inicial de funcionamiento para cada una de las soluciones, en ellas se incluye el costo de los productos químicos en relación con el peso necesario para llegar a cada una de las concentraciones deseadas.

El Cloruro de Calcio fue adquirido en la empresa INTERQUIMEC en la ciudad de Quito una cantidad de 55 Kg, los costos de adquisición de este se presentan en la tabla 10-4.

**Tabla 10-4.** Costo de Cloruro de Calcio

Producto o servicio	Unidad	Valor Unitario \$	Valor Total \$
Cloruro de Calcio	Kg	1,00	55,00
Permisos	N/A	30,00	30,00
Transporte	N/A	20,00	20,00
<b>TOTAL</b>			<b>105,00</b>

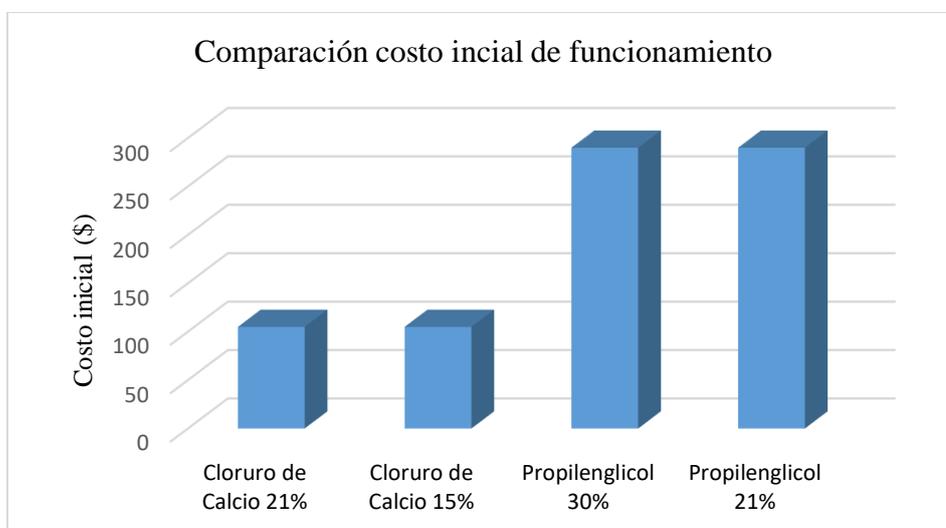
Realizado por: Autores

El Propilenglicol fue adquirido en la ciudad de Ambato, en la empresa INTEQ, una cantidad de 60 litros, cuyos costos se detallan en la siguiente tabla 11-4.

**Tabla 11-4.** Costo de Propilenglicol

Producto o servicio	Unidad	Valor Unitario \$	Valor Total \$
Propilenglicol	L	4,50	270,00
Transporte	N/A	20,00	20,00
<b>TOTAL</b>			<b>290,00</b>

Realizado por: Autores



**Gráfico 18-4.** Comparación costo inicial de funcionamiento

Fuente: Autores

El costo de adquisición del Cloruro de Calcio es menor que el del Propilenglicol, pero su adquisición lleva un mayor tiempo, esto debido a los permisos que exige la legislación ecuatoriana.

#### 4.7. Costos del proyecto

En esta sección se muestran todos los gastos del proyecto, los mismos se dividen en costos directos y costos indirectos.

##### 4.7.1. Costos directos

Aquí se toman en cuenta todos los costos que intervienen de forma directa en la realización del proyecto, estos costos se pueden dividir en costos de materiales del prototipo, costos de materia prima, costos de construcción y costos de mantenimiento de equipos de refrigeración.

En la tabla 12-4 se detallan los costos de los materiales empleados en la construcción del prototipo de pista de hielo.

**Tabla 12-4.** Costos de materiales del prototipo:

Elemento	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Tubería de cobre	3/4 de in	10,00	m	10	100,00
Codos de cobre	3/4 de in	9,00	u	0,5	4,50
Lamina de acero	1 mm pulida	1,00	u	20	20,00
Perfil Estructural	1x1 mm cuadrado	3,00	m	7,2	21,60
Aíslate poliuretano	Tipo sándwich	1,00	U	70	70,00
Brea	Industrial	20,00	Lb	2	40,00
Lamina Acrílica	200X14 cm	4,00	M	20	80,00
Aíslate para tubería	3/4 de in	8,00	M	3,75	30,00
Válvulas de paso	3/4 de in	2,00	U	7,3	14,60
Termocuplas	Tipo K	2,00	U	15	30,00
Ventilador	Corriente alterna	1,00	U	15	15,00

Realizado por: Autores

En la tabla 13-4 se detalla los costos de la materia prima utilizada para el sistema de refrigeración primario y secundario:

**Tabla 13-4.** Materia prima

Elemento	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Cloruro de Calcio	Industrial	55,00	kg	1,00	55,00
Propilen-Glicol	Industrial	60,00	Lt	4,50	270,00
Refrigerante	R404a	3,00	kg	17,00	51,00

Realizado por: Autores

En la tabla 14-4 se detallan los costos de construcción en el prototipo de pista de hielo:

**Tabla 14-4.** Costos de construcción

Elemento	Descripción	Valor total \$
Mano de Obra	Montaje de estructura	150,00
Soldadura	De estaño	200,00
Instalaciones	Hidráulicas	80,00

Realizado por: Autores

En la tabla 15-4 se detallan los costos de mantenimiento del sistema de refrigeración:

**Tabla 15-4.** Costos de mantenimiento

Elemento	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor unitario \$	Valor total \$
Lana de Vidrio	Aislante Térmico	4,00	M	2,50	10,00
Bomba Hidráulica	Acero inoxidable	1,00	U	300,00	300,00
Unión Universal	3/4 in	2,00	U	1,00	2,00
Acople	3/4 in	1,00	U	1,00	1,00
Manómetro	120 psi	1,00	U	15,00	15,00
Temporizador	AC 220V 10A	1,00	U	30,00	30,00
Lijas	Para acero	5,00	U	0,50	2,50
Pintura	Esmalte	1,00	Lt	3,00	3,00
Empaque	Caucho	3,00	U	1,50	4,50

Realizado por: Autores

En la tabla 16-4 se detalla los costos totales de la implementación del prototipo de pista de hielo:

**Tabla 16-4.** Costos directos totales

<b>Costo</b>	<b>Valor \$</b>
Materiales del prototipo	425,70
Materia Prima	385,00
Costos de Construcción	430,00
Costos de mantenimiento	368,00
<b>Subtotal</b>	<b>1608,70</b>
<b>IVA (12%)</b>	<b>193,04</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1801,74</b>

**Realizado por:** Autores

#### **4.7.2. Costos indirectos**

Estos costos son los que no se relaciona directamente con el proceso de construcción del prototipo y son los que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 17-4.** Costos indirectos

<b>Costo</b>	<b>Valor \$</b>
Costos de ingeniería	120,00
Imprevistos	70,00
<b>TOTAL</b>	<b>190,00</b>

**Realizado por:** Autores

#### **4.7.3. Costos totales**

Los costos totales representan la suma entre los costos directos y los costos indirectos como se muestra en la tabla 18-4:

**Tabla 18-4.** Costos totales

<b>Costo</b>	<b>Valor \$</b>
Costos Directos	1801,74
Costos Indirectos	190,00
<b>Costo total</b>	<b>1991,74</b>

**Realizado por:** Autores

## CONCLUSIONES

Se logró la implementación del prototipo de pista de hielo, como una aplicación de los refrigerantes secundarios para la industria, así como la adquisición de datos de temperatura y caudal en tiempo real gracias la tarjeta DAQ con los cuales se pudo determinar los datos del proceso de refrigeración secundaria con las distintas concentraciones de las salmueras, los cuales variaron en función de sus concentraciones. Las concentraciones más bajas trabajan de mejor manera porque mientras más baja es la concentración su oposición a fluir también disminuye, con lo cual el equipo de bombeo trabaja a una menor carga aumentando la velocidad de enfriamiento.

Para una formación de capa de hielo que sea homogénea utilizando Cloruro de Calcio como refrigerante secundario a una concentración del 21% se necesitó 145 minutos , mientras que con la concentración de Cloruro de Calcio al 15% se necesitó 135 minutos, logrando en los dos casos una temperatura de -3 grados centígrados en la superficie, determinando que al 15% se presentan menores inconvenientes en el sistema de bombeo, debido a que posee una menor densidad que la concentración al 21% la cual presento problemas de calentamiento de la bomba.

Para una formación de capa de hielo que sea homogénea utilizando Propilenglicol como refrigerante secundario a una concentración del 30% se necesitó 150 minutos, mientras que con la concentración de Propilenglicol al 21% se necesitó 140 minutos, logrando en los dos casos una temperatura de -3 grados centígrados en la superficie, en los dos casos el sistema de bombeo tuvo problemas solo al momento de alcanzar las temperaturas más bajas alcanzadas por el chiller.

La variación de temperatura de la salmuera ( $\Delta T$ ) tanto del Propilenglicol como del Cloruro de Calcio a sus distintas concentraciones están en relación directa con la temperatura con la que ingresan al sistema de enfriamiento del prototipo de pista de hielo, alcanzando los valores más altos cuando su temperatura es cercana a la temperatura mínima proporcionada por el equipo chiller, siendo la solución de Cloruro de Calcio al 15% la que alcanza un valor máximo cercano a 0,7 grados Celsius.

La salmuera de Propilenglicol al 30% es la que mayor consumo energético demanda, entendiendo que para este sistema es innecesaria una concentración tan alta, ya que a pesar de llegar a temperaturas de -10 °C en el chiller, esta es innecesaria ya que se comprobó que con una temperatura de -7°C puede funcionar sin inconvenientes, además que al incrementar su densidad también representa un mayor desgaste en el sistema de bombeo.

La salmuera formada por el refrigerante secundario Cloruro de Calcio a una concentración del 15% es ligeramente más eficiente a la salmuera formada Propilenglicol al 21% en cuanto a tiempo de formación de hielo, y consumo energético, además presenta un costo de adquisición menor, sin embargo, se debe tener en cuenta que el Cloruro de Calcio es un producto corrosivo, lo que generaría un incremento en los costos inicial de diseño, así como costos de mantenimiento y

sistemas de protección, disminuyendo el tiempo de funcionamiento del sistema, se determina que la salmuera de Propilenglicol al 21% presenta características apropiadas para el proceso de formación de una pista de hielo, siendo esta la más apropiada para este caso de estudio.

## **RECOMENDACIONES**

Realizar un mantenimiento del equipo de refrigeración, revisando periódicamente el nivel del refrigerante primario en el chiller, así como el estado de las válvulas y cañerías que conforman el serpentín del prototipo de la pista de hielo, para de esta manera evitar contratiempos en futuras experimentaciones.

Realizar una valoración del tanque de almacenamiento de la salmuera, o de ser el caso reemplazar el mismo por un tanque más pequeño y que cuente con un sistema de desfogue, de materiales que sean resistentes a la corrosión como puede ser polietileno de alta densidad, así se evitara las fugas de refrigerante secundario hacia el medio ambiente.

Se recomienda en caso de continuar las investigaciones con salmueras de Cloruro de Calcio, implementar sistemas anticorrosivos como protección catódica o un sistema de corrientes impresas, esto con la finalidad de precautelar la integridad de los equipos.

Realizar una limpieza de la bomba después de utilizar cualquiera de los dos refrigerantes secundarios haciendo circular agua pura por un tiempo prudente, así se evitará daños por atascamiento.

Desarrollar un proyecto en el cual se realice la automatización del equipo chiller, para que se puede llegar a una temperatura deseada y mantenerla ahí por largos intervalos de tiempo, esto con la finalidad de evitar problemas de congelamiento en el evaporador y en el sistema de bombeo.

Se recomienda continuar la investigación de los sistemas de refrigeración primaria y secundaria, desarrollando actividades que complementen la formación profesional en la parte teórico-práctica como la ejecución de ensayos de laboratorio periódicamente para mantener funcionales los equipos de laboratorio, las cuales permitan entender los principios de transferencia de calor, refrigeración y termodinámica.

## BIBLIOGRAFIA

**AIMENDARIZ LLANOS, Galo Rodrigo & LARA GAVILANES Diego Israel.** Diseño, construcción y pruebas de un chiller para el laboratorio de transferencia de calor. [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2014. pp. 53-63. [Consulta: 2018-11-08]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3525/1/15T00568.pdf>

**ASHRAE STANDARD 2017.** *Fundamental Handbook*.

**ASHRAE STANDARD 2018.** *handbook refrigeration*. Atlanta.

**ASHRAE STANDARD 34-2010.** *Designation and Safety Classification of Refrigerants*.

**BALSECA SAMPEDRO, Otto Fernando.** Metodología para el diseño hidrodinámico de oleoducto de crudos pesados. [En línea] (Trabajo de titulación). (Mestría) Escuela Superior Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2016. p. 9. [Consulta: 2018-12-10]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16895/1/CD-7474.pdf>

**BARRAGÁN GARCIA, Diego Arnaldo & MACHADO GUIJARRO, Viviana Noemy.** Diseño y construcción de un prototipo de una pista de hielo artificial. [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2013. pp. 75-82. [Consulta: 2019-01-10]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2960/1/15T00545.pdf>

**BELACHE, O, OUZZANE, M & GALANIS, N.** "Numerical prediction of ventilation patterns and thermal processes in ice rinks". *Building and environment*. vol. 40, (2005), (United State of America) pp. 417-426.

**BUENAÑO SANCHEZ, Luis Efrén & ESPARZA MONTERO, Marcel Ruperto.** Diseño y construcción de un sistema de refrigeración de conservación para laboratorio. [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2010. pp. 63-66. [Consulta: 2019-01-25]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/394/1/15T00445.pdf>

**CALM, James M.** "Options and outlook for chiller refrigerants." *International Journal of Refrigeration*, vol. 25, (2002), (United State of America) pp. 705-715.

**ÇENGEL, Yunus & BOLES, Michael A.** *Termodinámica*. 7 ed. México, D.F, Mexico, 2012, p 959.

**ÇENGEL, Yunus A. 2007.** *Transferencia de Calor y Masa*. 3 ed. México, D.F, México, 2007, pp 6-865

**De la Morena Cancela, Javier.** Eficiencia energética en motores eléctricos. Normativa IEC 600034-30. [en línea]. 2012. [Consulta: 22 junio 2019]. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/formacion/e3plus2012/15-eficiencia-energetica-en-motores-electricos.pdf>

**DOW.** PROPILENGLICOL PROPIEDADES FISICAS. Michigan, 2000. p 5

**FELLOWS, P.** *Food processing technology principles and practice*. [en línea]. 4 ed, Amsterdam-Paises Bajos: woodhead publishing, 2017. [Consulta: 20 enero 2019]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=pCilCgAAQBAJ&pg=PA847&lpg=PA847&dq=heat+remove+by+refrigeration+fellows&source=bl&ots=kYoy1CjcJj&sig=ACfU3U1fmwGFTU0uJC-ynu5H8u2pLEKj1A&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwic66rt6abjAhWHslkKHbROB8cQ6AEwAHoECAkQAQ#v=onepage&q=heat%20>

**GUAMAN CABA, Paul Alejandro & MUÑOZ VALLE, Christian Mauricio.** Análisis de datos de un chiller para determinar el comportamiento de las curvas de enfriamiento del Propilenglicol y su comparación con el Cloruro de Calcio. [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2017. pp. 88-100. [Consulta: 2019-02-15]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8078/1/15T00677.pdf>

**HERNÁNDEZ MENESES, Jonathan Marcelo & TRUJILLO CASTILLO, Joffre Fernando.** Diseño y construcción de un generador de hielo en bloque para el laboratorio de refrigeración. [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2015. pp. 90-93. [Consulta: 2019-02-24]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4644/1/15T00591.pdf>

**HOLMAN, J.** *Transferencia de calor*. Madrid-España: mcgraw-interamericana de españa, s. a. u., 1998. p1

**HUNDY, G & et al.** *Refrigeration air conditioning and heat pumps*. [en línea]. 2016. [Consulta: 2 febrero 2019]. Disponible en: <http://4mechengineer.com/?s=refrigeration+air+conditioning+and+heat+pumps>.

**IIHF.** Guía de Construcción de pistas de hielo IIHF. 2017. pp 18-43

**KAYA, Roni.** Energy usage in ice rink resurfacing. [En línea] (Trabajo de titulación). (Maestria) KTH School of industrial engineering and management, Stockholm, Sweden. 2017. pp. 18.

[Consulta: 2019-03-25]. Disponible en: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1138683/FULLTEXT01.pdf>

**MACAS SARABIA, José Stalin & TOINGA MOLINA, Esteban Eduardo.** Repotenciación y análisis de datos del chiller del laboratorio de transferencia de calor, para la determinación de las curvas de enfriamiento. [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2015. pp. 60-65. [Consulta: 2019-03-12]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4653/1/15T00623.pdf>

**MORENO, Telmo J.; & Otros.** "Análisis comparativo de la utilización de refrigerantes alternativos en un chiller". *Dominio de las ciencias*, vol. 4, (2018), (Ecuador) pp. 418-433.

**OCCIDENTAL CHEMICAL CHILE LIMITADA.** Manual Cloruro de Calcio. 2006. p4.

**PEÑALOZA PEREZ, Jairo Lenín & URGILÉS REMACHE, Fausto Marcelo.** Diseño y construcción de un intercambiador de tubería aletada para el laboratorio de térmicas de la Facultad de Mecánica. [En línea] (Trabajo de titulación). (Tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. 2009. pp. 45-50. [Consulta: 2019-03-15]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/39>

**PEDROLLO.** Electrobombas multicelulares autocebantes. San Bonifacio, 2019. p.1

**VALLEJO, Javier P.; & Otros. 2018.** "Flow behaviour of suspensions of functionalized graphene nanoplatelets in propylene glycol-water mixtures". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 91, (2018), (España) pp. 150-157.