



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **“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”**

**GUAMAN CABA PAUL ALEJANDRO  
MUÑOZ VALLE CHRISTIAN MAURICIO**

## **TRABAJO DE TITULACIÓN** **TIPO: TRABAJOS EXPERIMENTALES**

**Previo a la obtención del Título de:**

## **INGENIERO MECÁNICO**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2017**

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2017-04-24

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparada por:

**GUAMAN CABA PAUL ALEJANDRO**

Titulada:

**“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”**

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

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Telmo Moreno Romero  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

Ing. Edwin Viteri Nuñez  
**MIEMBRO**

---

**APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

2017-04-24

Yo recomiendo que el Trabajo de Titulación preparada por:

**MUÑOZ VALLE CHRISTIAN MAURICIO**

Titulada:

**“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”**

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

**INGENIERO MECÁNICO**

---

Ing. Carlos Santillán Mariño  
**DECANO FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Telmo Moreno Romero  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

Ing. Edwin Viteri Nuñez  
**MIEMBRO**

---

## **EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** GUAMAN CABA PAUL ALEJANDRO

**TÍTULO DE LA TESIS:** “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”

**Fecha de Examinación:** 2017-11-17

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Angel Guamán M <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Telmo Moreno Romero <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Ing. Edwin Viteri Núñez <b>ASESOR</b>			

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

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

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

---

Ing. Angel Guamán M  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

## **EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** MUÑOZ VALLE CHRISTIAN MAURICIO

**TÍTULO DE LA TESIS:** “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”

**Fecha de Examinación:** 2017-11-17

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

<b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>	<b>APRUEBA</b>	<b>NO APRUEBA</b>	<b>FIRMA</b>
Ing. Angel Guamán M <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Telmo Moreno Romero <b>DIRECTOR DE TESIS</b>			
Ing. Edwin Viteri Núñez <b>ASESOR</b>			

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

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

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

---

Ing. Angel Guamán M  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

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

---

**Guaman Caba Paul Alejandro**

---

**Muñoz Valle Christian Mauricio**

## **DECLARACION DE AUTENTICIDAD**

Nosotros, Paul Alejandro Guaman Caba y Christian Mauricio Muñoz Valle, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. 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.

---

**Guaman Caba Paul Alejandro**

---

**Muñoz Valle Christian Mauricio**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo dedico a mi familia, de manera especial mis padres Alejandro y Teresa que me supieron brindar su apoyo incondicional para culminar mi carrera universitaria y a mis hermanos Alex y Valeria quienes han sido un soporte fundamental a lo largo de mi vida.

**Paul Alejandro Guaman Caba**

A mis padres por darme las fuerzas necesarias para nunca dejarme vencer por nada ni por nadie a mis hermanos por estar siempre conmigo y a mi familia por ser el combustible que me faltaba para poder terminar mi carrera.

**Christian Mauricio Muñoz Valle**



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la vida, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y personal que conforma la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindarme la oportunidad de obtener una profesión, de la misma manera agradezco a familiares y amigos que de alguna manera me ayudaron a cumplir satisfactoriamente esta etapa de mi vida.

**Paul Alejandro Guaman Caba**

Agradezco a mi Dios por haberme permitido alcanzar una meta más en mi vida por darme la fe y la salud para lograr culminar este trabajo, también a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y de manera muy especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica y a todos sus colaboradores que de algún modo hicieron posible que se haga realidad este sueño de ser profesional, y principalmente a mi familia a mis padres a mis hermanos y a mi esposa por siempre apoyarme y nunca dejarme en mis momentos más difíciles.

**Christian Mauricio Muñoz Valle**

# CONTENIDO

Pág.

## RESUMEN

## SUMMARY

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	
2.1	Antecedentes.....	1
2.2	Justificación.....	2
2.3	Objetivos.....	3
1.1.1	<i>Objetivo general</i> .....	3
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	3
<b>2</b>	<b>MARCO REFERENCIAL</b>	
2.1	Fundamento teórico y variables del proceso de refrigeración.....	5
2.1.1	<i>Variables del proceso de refrigeración</i> .....	6
2.1.1.1	<i>Temperatura</i> .....	6
2.1.1.2	<i>Flujo volumétrico</i> .....	6
2.1.2	<i>Calor</i> .....	6
2.1.2.1	<i>Calor sensible:</i> .....	7
2.1.2.2	<i>Calor Latente:</i> .....	7
2.1.3	<i>Propiedades de los fluidos refrigerantes</i> .....	8
2.1.3.1	<i>Densidad</i> .....	8
2.1.3.2	<i>Viscosidad de los fluidos</i> .....	8
2.1.4	<i>Curvas de enfriamientos</i> .....	9
2.1.4.1	<i>Curva temperatura vs tiempo</i> .....	10
2.1.4.2	<i>Curva caudal vs tiempo</i> .....	10
2.1.4.3	<i>Curva velocidad de enfriamiento vs temperatura</i> .....	10
2.2	Sistema de refrigeración por compresión de vapor.....	10
2.2.1	<i>Proceso de compresión</i> .....	11
2.2.2	<i>Proceso de condensación</i> .....	12
2.2.3	<i>Proceso de expansión</i> .....	12
2.2.4	<i>Proceso de evaporación</i> .....	12
2.3	Equipo de refrigeración chiller.....	12
2.3.1	<i>Sistema de adquisición de datos</i> .....	13

2.3.1.1	<i>Sensor de temperatura</i> .....	13
2.3.1.2	<i>Caudal</i> .....	14
2.3.2	<i>Compresor hermético</i> .....	15
2.3.3	<i>Condensador enfriado por aire.</i> .....	16
2.3.4	<i>Válvula de expansión termostática.</i> .....	18
2.3.5	<i>Evaporador de placas</i> .....	19
2.3.6	<i>Bomba centrífuga</i> .....	20
2.4	<i>Criterios de análisis y evaluación de sistemas de refrigeración</i> .....	21
2.4.1	<i>Efecto de refrigeración y carga de refrigeración.</i> .....	21
2.4.2	<i>Coefficiente de rendimiento</i> .....	22
2.4.3	<i>Caballos fuerza por tonelada de refrigeración.</i> .....	23
2.5	<i>Medios de enfriamiento en equipos chiller.</i> .....	23
2.5.1	<i>Anticongelantes con base cloruro.</i> .....	24
2.5.1.1	<i>Cloruro de sodio</i> .....	24
2.5.1.2	<i>Cloruro de calcio.</i> .....	25
2.5.2	<i>Anticongelantes con base alcohol.</i> .....	25
2.5.2.1	<i>Metanol</i> .....	25
2.5.2.2	<i>Etanol</i> .....	25
2.5.3	<i>Anticongelantes con base glicol.</i> .....	26
2.5.3.1	<i>Etilenglicol</i> .....	26
2.5.3.2	<i>Propilenglicol</i> .....	26
2.5.4	<i>Refrigerante con base amoníaco amoníaco</i> .....	27

### **3 FASE EXPERIMENTAL**

3.1	<i>Determinación del estado técnico del equipo chiller.</i> .....	29
3.1.1	<i>Inspección visual.</i> .....	29
3.1.2	<i>Análisis del medio ambiente de trabajo</i> .....	30
3.1.3	<i>Pruebas y mediciones.</i> .....	31
3.1.4	<i>Calculo del COP</i> .....	34
3.2	<i>Fase de experimentación.</i> .....	36
3.2.1	<i>Condiciones de entorno para la experimentación</i> .....	36
3.2.2	<i>Temperatura de congelación de la solución de propilenglicol</i> .....	37
3.2.3	<i>Pruebas experimentales con la concentración del 15%</i> .....	37
3.2.3.1	<i>Determinación de la concentración al 15%</i> .....	37
3.2.3.2	<i>Verificación de la concentración al 15% por el método del picnómetro.</i> .....	38
3.2.2.3	<i>Prueba N°1</i> .....	39

3.2.2.4	<i>Prueba N°2.....</i>	42
3.2.2.5	<i>Prueba N°3.....</i>	44
3.2.2.6	<i>Prueba N°4.....</i>	46
3.2.4	<i>Curvas de enfriamiento para la solución de propilenglicol al 15% .....</i>	48
3.2.5	<i>Pruebas experimentales con la concentración del 21% .....</i>	49
3.2.5.1	<i>Determinación de la solución al 21%.de concentración. ....</i>	49
3.2.5.2	<i>Verificación de la concentración del 21% por el método del picnómetro. ....</i>	50
3.2.4.3	<i>Prueba N°5.....</i>	50
3.2.4.4	<i>Prueba N°6.....</i>	52
3.2.4.5	<i>Prueba N°7.....</i>	54
3.2.4.6	<i>Prueba N°8.....</i>	56
3.2.6	<i>Curvas de enfriamiento para la solución de propilenglicol al 21% .....</i>	57
3.2.7	<i>Pruebas experimentales con la concentración al 30%.....</i>	59
3.2.7.1	<i>Determinación de la solución al 30% de concentración. ....</i>	59
3.2.6.2	<i>Prueba N°9.....</i>	59
3.2.6.3	<i>Prueba N°10.....</i>	61
3.2.6.4	<i>Prueba N°11.....</i>	63
3.2.6.5	<i>Prueba N°12.....</i>	65
3.2.8	<i>Curvas de enfriamiento para la solución de propilenglicol al 30% .....</i>	68

#### **4 COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLUCION DE CACL2 Y PROPILENGLICOL**

4.1	Temperatura de congelación de la solución para cada concentración.....	69
4.2	Solución al 15% de concentración.....	70
4.2.1	<i>Análisis al 15% de concentración y 100% de apertura de válvula. ....</i>	70
4.2.2	<i>Análisis al 15% de concentración y 75% de apertura de válvula. ....</i>	72
4.2.3	<i>Análisis al 15% de concentración y 50% de apertura de la válvula. ....</i>	73
4.2.4	<i>Análisis al 15% de concentración y 25% de apertura de válvula. ....</i>	75
4.3	Soluciones al 21% de concentración. ....	77
4.3.1	<i>Análisis al 21% de concentración y 100% de apertura de la válvula. ....</i>	77
4.3.2	<i>Análisis al 21% de concentración y 75% de apertura de la válvula. ....</i>	79
4.3.3	<i>Análisis al 21% de concentración y 50% de apertura de la válvula. ....</i>	81
4.3.4	<i>Análisis al 21% de concentración y 25% de apertura de la válvula. ....</i>	83
4.4	Solución al 30% de concentración.....	84
4.4.1	<i>Análisis al 30% de concentración y 100% de apertura de la válvula. ....</i>	85
4.4.2	<i>Análisis al 30% de concentración y 75% de apertura de la válvula. ....</i>	88

4.4.3	<i>Análisis al 30% de concentración y 50% de apertura de la válvula.....</i>	89
4.4.4	<i>Análisis al 30% de concentración y 25% de apertura de la válvula.....</i>	91
4.5	<i>Análisis del consumo de energía para las dos soluciones .....</i>	92
4.5.1	<i>Determinación de la potencia consumida por la unidad condensadora.....</i>	92
4.5.2	<i>Consumo de energía para la concentración de 15%. .....</i>	93
4.5.3	<i>Análisis del consumo de energía para la concentración de 21%.....</i>	94
4.5.4	<i>Análisis del consumo de energía para la concentración de 30%.....</i>	95
4.6	<i>Características generales de la solución de propilenglicol y de CaCl<sub>2</sub>.....</i>	96
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1	Conclusiones .....	98
5.2	Recomendaciones.....	99

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-2:</b> Factor de consumo de energía.....	27
<b>Tabla 1-3:</b> Materiales del equipo chiller que se encuentran en contacto con el propilenglicol..	31
<b>Tabla 2-3:</b> Presiones manométricas en la unidad condensadora.....	32
<b>Tabla 3-3:</b> Estados del ciclo estándar de refrigeración por compresión.....	34
<b>Tabla 4-3:</b> Datos de la solución de propilenglicol al 15%.....	39
<b>Tabla 5-3:</b> Datos de prueba N°1 .....	40
<b>Tabla 6-3:</b> Datos de prueba N°2.....	42
<b>Tabla 7-3:</b> Datos de prueba N°3.....	44
<b>Tabla 8-3:</b> Datos de prueba N°4.....	45
<b>Tabla 9-3:</b> Datos para la determinación de la densidad de la solución al 21%.....	50
<b>Tabla 10-3:</b> Datos de prueba N°5.....	50
<b>Tabla 11-3:</b> Datos de prueba N°6.....	52
<b>Tabla 12-3:</b> Datos de prueba N°7.....	54
<b>Tabla 13-3:</b> Datos de prueba N°8.....	55
<b>Tabla 14-3:</b> Datos de prueba N°9.....	59
<b>Tabla 15-3:</b> Datos de prueba N°10.....	61
<b>Tabla 16-3:</b> Datos de prueba N°11.....	63
<b>Tabla 17-3:</b> Datos de prueba N°12.....	65
<b>Tabla 1-4:</b> Temperatura de congelación correspondiente a cada concentración.....	70
<b>Tabla 2-4:</b> Comparacion de la velocidad de enfriamiento concentración 15% válvula 100%...	72
<b>Tabla 3-4:</b> Comparación de la velocidad de enfriamiento concentración 21% válvula 100%...	79
<b>Tabla 4-4:</b> Comparación de la velocidad de enfriamiento concentración 30% válvula 100%...	87
<b>Tabla 5-4:</b> Comparación general de las soluciones de propilenglicol y de CaCl <sub>2</sub> .....	97

## LISTA DE GRÁFICOS

	<b>Pág.</b>
<b>Gráfico 1-2:</b> Diagrama calor vs temperatura .....	7
<b>Gráfico 2-2:</b> Diagrama P-h para la representación del ciclo estándar .....	11
<b>Gráfico 3-2:</b> Diagrama P-h correspondiente al ciclo real .....	11
<b>Gráfico 4-2:</b> Variación del COP con la temperatura de evaporación.....	23
<b>Gráfico 5-2:</b> Gravedad específica de la salmuera de cloruro de sodio.....	25
<b>Gráfico 6-2:</b> Densidad de la solución de a base de etilenglicol. ....	26
<b>Gráfico 1-3:</b> Ciclo estándar de refrigeración por compresión de vapor .....	35
<b>Gráfico 2-3:</b> Temperatura de congelación de la solución de propilenglicol.....	37
<b>Gráfico 3-3:</b> Densidad de la solución de propilenglicol .....	39
<b>Gráfico 4-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°1 .....	42
<b>Gráfico 5-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°2.....	44
<b>Gráfico 6-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°3.....	45
<b>Gráfico 7-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°4.....	47
<b>Gráfico 8-3:</b> Curvas de enfriamiento temperatura vs tiempo para solución al 15% .....	48
<b>Gráfico 9-3:</b> Curvas de enfriamiento caudal vs tiempo para solución al 15% .....	48
<b>Gráfico 10-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°5.....	52
<b>Gráfico 11-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°6.....	54
<b>Gráfico 12-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°7.....	55
<b>Gráfico 13-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°8.....	57
<b>Gráfico 14-3:</b> Curvas de enfriamiento temperatura vs tiempo para solución al 21% .....	48
<b>Gráfico 15-3:</b> Curvas de enfriamiento caudal vs tiempo para solución al 21% .....	48
<b>Gráfico 16-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°9.....	61
<b>Gráfico 17-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°10.....	63
<b>Gráfico 18-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°11.....	65
<b>Gráfico 19-3:</b> Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°12.....	67
<b>Gráfico 20-3:</b> Curvas de enfriamiento temperatura vs tiempo para solución al 30% .....	68
<b>Gráfico 21-3:</b> Curvas de enfriamiento caudal vs tiempo para solución al 30% .....	68
<b>Gráfico 1-4:</b> Temperatura de congelación de la solución de CaCl <sub>2</sub> .....	69
<b>Gráfico 2-4:</b> Caudal para la solución al 15% y válvula al 100% de apertura.....	70
<b>Gráfico 3-4:</b> Temperatura para la solución al 15% y válvula al 100% de apertura.....	71
<b>Gráfico 4-4:</b> Caudal para la solución al 15% y válvula al 75% de apertura.....	72
<b>Gráfico 5-4:</b> Temperatura para la solución al 15% y válvula al 75% de apertura.....	73
<b>Gráfico 6-4:</b> Caudal de la solución al 15% y válvula al 50% de apertura.....	74

<b>Gráfico 7-4:</b> Temperatura para la solución al 15% y válvula al 50% de apertura.....	75
<b>Gráfico 8-4:</b> Caudal para la solución al 15% y válvula al 25% de apertura.....	76
<b>Gráfico 9-4:</b> Temperatura para la solución al 15% y válvula al 25% de apertura.....	76
<b>Gráfico 10-4:</b> Caudal para la solución al 21% y válvula al 100% de apertura.....	78
<b>Gráfico 11-4:</b> Comparación de la temperatura concentración 21% válvula 100% .....	78
<b>Gráfico 12-4:</b> Caudal para la solución al 21% y válvula al 75% de apertura.....	80
<b>Gráfico 13-4:</b> Temperatura para la solución al 21% y válvula al 75% de apertura.....	81
<b>Gráfico 14-4:</b> Caudal para la solución al 21% y válvula al 50%.de apertura.....	82
<b>Gráfico 15-4:</b> Temperatura para la solución al 21% y válvula al 50% de apertura.....	82
<b>Gráfico 16-4:</b> Caudal para la solución al 21% y válvula al 25% de apertura.....	83
<b>Gráfico 17-4:</b> Temperatura para la solución al 21% y válvula al 25% de apertura.....	84
<b>Gráfico 18-4:</b> Caudal para la solución al 30% y válvula al 100% de apertura.....	86
<b>Gráfico 19-4:</b> Temperatura para la solución al 30% y válvula al 100% .....	87
<b>Gráfico 20-4:</b> Caudal para la solución al 30% y válvula al 75% de apertura.....	88
<b>Gráfico 21-4:</b> Temperatura para la solución al 30% y válvula al 75% de apertura.....	89
<b>Gráfico 22-4:</b> Caudal para la solución al 30% y válvula al 50% de apertura.....	90
<b>Gráfico 23-4:</b> Temperatura para la solución al 30% y válvula al 50% de apertura.....	91
<b>Gráfico 24-4:</b> Caudal para la solución al 30% y válvula al 25%.de apertura.....	91
<b>Gráfico 25-4:</b> Temperatura para la solución al 30% y válvula al 25% de apertura.....	92



## ISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-2:</b> Elementos principales del chiller .....	13
<b>Figura 2-2:</b> Distancia para la ubicación del instrumento .....	14
<b>Figura 3-2:</b> Disposición del sensor en la tubería .....	14
<b>Figura 4-2:</b> Vista de sesión del compresor hermético.....	16
<b>Figura 5-2:</b> Condensador enfriado por aire.....	17
<b>Figura 6-2:</b> Elementos de una válvula de expansión termostática.....	19
<b>Figura 7-2:</b> Evaporador de placas.....	20
<b>Figura 1-3:</b> Estado final de las tuberías luego del re-aislamiento.....	30
<b>Figura 2-3:</b> Mirilla para comprobar el nivel de aceite en el compresor.....	30
<b>Figura 3-3:</b> Comprobación del funcionamiento de sensores.....	32
<b>Figura 4-3:</b> Toma de datos de presiones de funcionamiento del compresor .....	33
<b>Figura 5-3:</b> Medición de la masa del picnómetro .....	38
<b>Figura 6-3:</b> Aparición de escarcha en tubería que va al compresor.....	41
<b>Figura 7-3:</b> Congelamiento en el evaporador.....	47
<b>Figura 8-3:</b> Congelamiento en el conducto de baja de la unidad condensadora.....	67
<b>Figura 9-3:</b> Congelamiento en la bomba.....	67

## **LISTA DE ABREVIACIONES**

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society of Testing Materials
BTU	British Thermal Unit
COP	Coefficient Of Performance
FDA	Food and Drug Administration
NTC	Negative Temperature Coefficient

## SIMBOLOGÍA

A	Área de transferencia de calor	m <sup>2</sup>
$\lambda_f$	Calor latente de fusión	kJ/kg
$\beta$	Constante característica del Termistor NTC	-
C	Concentración de la solución	%
$C_p$	Calor específico a presión constante	kJ/kg-°C
ER	Efecto de refrigeración	kJ/kg
f	Factor de fricción	-
FP	Factor de potencia	-
g	Gravedad	m/s <sup>2</sup>
H	Altura manométrica	m
h	Entalpía	kJ/kg-K
P	Presión	Pa
$\rho$	Densidad	kg/m <sup>3</sup>
Pc	Potencia consumida	kW-h
Q	Caudal	m <sup>3</sup> /s
Q	Calor	kJ
r	Resistencia eléctrica	$\Omega$
Re	Número de Reynolds	-
$r_p$	Relación de compresión	-
T	Temperatura	K
U	Coefficiente global de transferencia de calor	w/°C-m <sup>2</sup>
$\mu$	Viscosidad absoluta	Pa-s
v	Velocidad	m/s
V	Volumen	m <sup>3</sup>
v	Viscosidad cinemática	m <sup>2</sup> /s
V enf.	Velocidad de enfriamiento	°C/min
w	Trabajo	kJ

## **LISTA DE ANEXOS**

- A Comparación de prestaciones de refrigerantes secundarios
- B Propiedades de la disolución de cloruro de calcio
- C Conductividad térmica de una disolución acuosa de propilenglicol
- D Densidad de una disolución acuosa de propilenglicol
- E Viscosidad de la solución de cloruro de calcio
- F Viscosidad de la solución de propilenglicol

## RESUMEN

La reducción de consumo energético ha motivado a mejorar los sistemas de refrigeración existentes por lo tanto se analizó el funcionamiento de un equipo chiller y el comportamiento del refrigerante secundario a base de propilenglicol en reemplazo de la solución de cloruro de calcio, esto con la finalidad de obtener el funcionamiento eficiente de este equipo. La fase experimental de este proyecto evalúa 218 litros de solución de propilenglicol a una concentración de 15%, 21% y 30%. Las variables de análisis del proyecto son temperatura, caudal y tiempo, las mismas que son adquiridas mediante una interfaz de usuario con la utilización del software LabView, esta interfaz además facilita el control de un servo motor que acciona una válvula para conseguir la variación del caudal de circulación del propilenglicol, lo que ha permitido observar la influencia del caudal sobre el proceso de refrigeración en sistemas indirectos. El enfriamiento de la solución de propilenglicol inicia desde la temperatura ambiente hasta temperaturas cercanas a los  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  dependiendo de las propiedades de la solución. Los datos obtenidos permiten la realización de curvas de enfriamiento del refrigerante secundario, las curvas muestran una variación de temperatura y de velocidad de enfriamiento distintas al comportamiento de las curvas de enfriamiento del cloruro de calcio, en el que la solución de propilenglicol requiere de mayor tiempo para llegar a la misma temperatura que la solución de cloruro de calcio, esto conlleva a que desde el punto de vista térmico el propilenglicol tiene propiedades inferiores que la salmuera de cloruro de calcio, aunque a nivel práctico se necesita analizar mayor cantidad de los aspectos según la aplicación para realizar una selección óptima de un refrigerante secundario como se muestra en el desarrollo de este documento.

**PALABRAS CLAVES:** <CHILLER (EQUIPO DE REFRIGERACIÓN)>, <PROPILENGLICOL (ANTICONGELANTE)>, <CLORURO DE CALCIO>, <CURVA DE ENFRIAMIENTO>, <REFRIGERANTE SECUNDARIO>, <ANTICONGELANTE>.

## SUMMARY

The reduction of energy consumption has motivated to improve the existing refrigeration systems, therefore the operation of a chiller equipment and the behavior of the secondary refrigerant based on propylene glycol in replacement of the calcium chloride solution was analyzed, this with the purpose of get the efficient operation of this equipment. The experimental phase of this project evaluates 218 liters of propylene glycol solution at a concentration of 15%, 21% and 30%. The variables of analysis of the project are temperature, flow and time, which are acquired through a user interface with the use of LabView software, this interface also facilitates the control of a servo motor that drives a valve to achieve the variation of the flow of propylene glycol circulation, which has made it possible to observe the influence of the flow on the refrigeration process in indirect systems. The cooling of the propylene glycol solution starts from room temperature to temperatures close to  $-10^{\circ}\text{C}$  depending on the properties of the solution. The data obtained allow the realization of cooling curves of the secondary refrigerant, the curves show a variation of temperature and cooling speed different from the behavior of the cooling curves of calcium chloride, in which the propylene glycol solution requires more time to reach the same temperature as the calcium chloride solution, this leads to the fact that from the thermal point of view propylene glycol has lower properties than calcium chloride brine, although at a practical level it is necessary to analyze a greater number of aspects according to the application in order to make an optimal selection of a secondary refrigerant as shown in the development of this document.

KEY WORDS: <CHILLER (REFRIGERATION EQUIPMENT)>, <PROPYLENEGLICOL (ANTIFREEZE)>, <CALCIUM CHLORIDE>, <COOLING CURVE>, <SECONDARY REFRIGERANT>, <ANTIFREEZE>.

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN.

### 2.1 Antecedentes.

La refrigeración es un proceso utilizado en varios tipos de industria, ya sea con fines de conservación de alimentos, acondicionamiento de aire o cualquier proceso donde se requiera la disminución de temperatura de un medio. En la actualidad se cuenta con gran variedad de equipos que permiten obtener la refrigeración, entre estos se cuenta con refrigeradores, torres de enfriamiento y evaporación, chiller, etc. los mismos que se adapta a distintas aplicaciones.

Hoy en día el sistema de refrigeración por compresión de vapor es el más utilizado, los principales componentes de este sistema son: compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador (FRANCO LIJÓ, 2006, p.1), este sistema es el que utiliza el equipo chiller para conseguir la refrigeración

El chiller es un enfriador indirecto con aplicaciones comerciales e industriales en la producción de alimentos, aire acondicionado, industria de polímeros y mecánica como enfriador de los equipos, en el sistema indirecto el refrigerante primario o del ciclo de refrigeración no entra en contacto con el medio enfriado y además tiene la ventaja de disminuir fugas y carga del refrigerante primario por lo cual es utilizado para enfriar medios remotos sin que se eleve el costo de la instalación. (MELINDER, 2010, p.1507).

El fluido que entra en contacto con el medio refrigerado es el refrigerante secundario, el mismo que durante el proceso de refrigeración no cambian de fase, por lo que al realizar la selección de un anticongelante para formar un refrigerante secundario se debe tomar en cuenta que posea propiedades favorables para producir una transferencia eficiente de calor (PRABHAKARAN et al., 2016, p.4)

Actualmente en países con gran desarrollo tecnológico se estudia el uso de refrigerantes secundarios con nanopartículas suspendidas en un fluido base, a esta mezcla de las dos sustancias se conoce como nanofluidos, mediante la adición de nanopartículas al fluido base se pretende obtener mejoras en las características para la transferencia de calor (PRABHAKARAN et al., 2016, p.4). Los nanofluidos poseen difícil acceso, costo elevado y el sistema necesita

características especiales para su funcionamiento, por lo que este tipo de tecnología es de difícil implementación en nuestro medio.

Para considerar un fluido como refrigerante secundario se debe tener en cuenta su manipulación, costo, toxicidad, corrosión, inflamabilidad, contaminación (MELINDER, 2000, pp.1-2) y que sea factible su implementación en los sistemas existentes como en el caso de este proyecto.

La industria local utiliza agua y salmueras de cloruro como refrigerantes secundarios, el agua no puede trabajar a temperaturas menores de 0°C y las salmueras resultan ser excesivamente corrosivas sin la presencia de un correcto inhibidor de la corrosión. La salmuera de cloruro del calcio tiene bajo punto de congelación, alto calor específico, y actualmente se cuenta con las curvas de enfriamiento, las mismas que fueron obtenidas en el trabajo de MACAS & TOAINGA (2015, pp.83-112) donde se analizó su comportamiento, el mismo que pueden ser comparados con el comportamiento de otros fluidos.

En regiones frías del mundo el fluido de transferencia de calor es una mezcla de propilenglicol y agua para evitar el congelamiento (SATTI et al., 2016, p.1), el propilenglicol tiene favorables propiedades como anticongelante y bajo nivel de toxicidad por lo que es utilizado en una gran cantidad de productos industriales y comerciales, siendo un excelente constituyente de anticongelantes y líquidos de deshielo de aeronaves y medios de transporte (WEXLER, 2014, pp.1113-1114)

Propilenglicol es también considerado un refrigerante de grado alimenticio utilizado en calentadores solares de agua, industria alimenticia (NEELIMA et al., 1989; citado en: PRABHAKARAN et al., 2016, p.4), fabricación de cerveza, procesamiento de la leche, fabricación de helados y bebidas, por estas características la solución de propilenglicol es el tema de estudio de este proyecto en el que se analiza el comportamiento de esta mezcla respecto a caudal, temperatura, tiempo de enfriamiento y su comparación con el comportamiento de la salmuera de cloruro de calcio para encontrar un sistema de refrigeración más óptimo.

## **2.2 Justificación.**

El presente trabajo se desarrolló con el propósito de compilar información acerca del uso y comportamiento de refrigerantes secundarios en equipos chiller, lo que permitirá entender el proceso de refrigeración que se lleva a cabo en este equipo siendo esto de gran utilidad ya que el mismo tiene gran cantidad de aplicaciones en los procesos de refrigeración tanto a nivel industrial y comercial, los resultados de esta investigación son las curvas características de enfriamiento de



la solución de propilenglicol mediante la obtención de datos de tiempo, temperatura y caudal, esto permite conocer de manera directa el comportamiento de un fluido en este tipo de sistemas y facilita su comportamiento con distintos fluidos de similar uso con la finalidad de conseguir un sistema de refrigeración óptimo.

El estudio de un sistema de refrigeración requiere un análisis completo del equipo y de los procesos térmicos de un ciclo de refrigeración, para eso se toma en cuenta las variables que afectan estos procesos, por tal motivo el proyecto desarrollado sirve de referencia para futuras investigaciones que se pueden desarrollar en nuestro medio con la finalidad de ampliar el conocimiento en el área de la refrigeración debido a que las investigaciones relacionadas con esta temática y adaptadas a las condiciones locales de entorno son muy escasas, es por esto que este proyecto se resume en un artículo científico en el que se muestra métodos, parámetros de evaluación y resultados, los mismo que pueden incentivar a la comunidad académica a la discusión sobre esta temática.

La necesidad de contar con sistemas de refrigeración eficientes hace posible que se requiriera tener una perspectiva amplia del comportamiento del chiller con distintos refrigerantes secundarios, esto es posible mediante el análisis de los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, determinándose así parámetros de funcionamiento para el uso de este tipo de fluidos, siendo lo mencionado de vital importancia en la toma de decisiones en la industria local en lo referente a la selección de un refrigerante secundario por lo que proyecto permiten tener mayor cantidad de criterios de análisis para que los encargadas de esta actividad realicen una correcta elección del fluido dependiendo de la aplicación.

## **2.3 Objetivos.**

### *1.1.1 Objetivo general.*

Analizar los datos de un chiller para determinar el comportamiento de las curvas de enfriamiento del propilenglicol con el propósito de comparar las curvas obtenidas con el cloruro de calcio.

### *1.1.2 Objetivos específicos.*

Recopilar la información relevante acerca del chiller y del propilenglicol.

Verificar y corregir el funcionamiento del chiller del laboratorio.

Realizar las pruebas experimentales para la obtención de datos.

Elaborar un artículo científico para dar a conocer los resultados del trabajo experimental hecho en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH.

## CAPITULO II

### 2 MARCO REFERENCIAL

En el presente capítulo se detalla conceptos relevantes, variables, equipos y materiales empleados en el proceso de refrigeración en equipos tipo chiller los mismo que se analizaron para el correcto desarrollo de este proyecto, y que son de vital importancia por su aplicabilidad en el campo de la ingeniería mecánica de manera especial en la refrigeración y procesos térmicos.

#### 2.1 Fundamento teórico y variables del proceso de refrigeración

Según DOSSAT (1990, p. 109) y el Manual Técnico de la Refrigeración Comercial (FUNDACION RED DE ENERGÍA BUN-CA, 2011, p.9) se define a la refrigeración como la transferencia de energía cuyo objetivo es disminuir y mantener la temperatura de un espacio o material por debajo de la temperatura ambiente, la reducción de temperatura de un material se realiza con la extracción de su calor utilizando sustancias o cuerpos de menor temperatura que el material que va a ser refrigerado, estas sustancias se conocen como refrigerantes.

La refrigeración tiene aplicaciones tanto a nivel industrial, comercial y doméstico, en el campo industrial se aplica en la fabricación y conservación de alimentos, y en plantas industriales donde se lleve a cabo procesos relacionados con enfriamiento de equipos y aplicaciones de aire acondicionado.

La refrigeración se puede producir mediante los siguientes sistemas: sistema de compresión de vapor, expansión de aire o gases y sistemas de refrigeración por absorción (WANG, 2000, p.404), el sistema de refrigeración por compresión de vapor que es el sistema de refrigeración más utilizado a nivel industrial, este produce el acondicionamiento de un determinado medio mediante la compresión del fluido refrigerante a baja temperatura y presión (RODRIGUEZ, 1990, p.429).

En este proyecto se estudia la transferencia de calor entre el evaporador del chiller y el fluido secundario mediante el análisis de las curvas características de enfriamiento del fluido, para esto se necesita tomar datos de temperatura y caudal, a continuación se detallan estos términos para entender este proceso.

### 2.1.1 Variables del proceso de refrigeración

2.1.1.1 *Temperatura* Puede definirse como la medida que cuantifica las sensaciones de calor y frío. (MÜLLER, 2002, pp.121-124), es de decir mide la capacidad que poseen los cuerpos para transportar calor, la temperatura no depende de la masa debido a que se la considera una propiedad intensiva. A nivel molecular la temperatura está relacionada con la velocidad que tienen las moléculas lo que conlleva a que mayor movimiento de las moléculas se tiene mayor temperatura.

2.1.1.2 *Flujo volumétrico* Se describe como la cantidad de volumen de un fluido que pasa por unidad de tiempo por una sección de un sistema cualquiera, expresándose esto en la siguiente ecuación (MOTT, 2006, p.146):

$$Q = A \cdot v \quad (1)$$

Dónde:

$Q$  = Flujo volumetrico o caudal [ $m^3/s$ ]

$A$  = Area de la sección [ $m^2$ ]

$v$  = velocidad promedio del flujo [ $m/s$ ]

El flujo volumétrico se relaciona con la cantidad de masa que circula mediante la densidad del fluido transportado conociéndose a esta cantidad como flujo másico y se expresa de la siguiente manera:

$$m = \rho \cdot Q \quad (2)$$

Dónde:

$m$  = Flujo masico [ $Kg^3/s$ ]

$Q$  = Flujo volumetrico o caudal [ $m^3/s$ ]

$\rho$  = Densidad del fluido [ $Kg^3/m^3$ ]

### 2.1.2 Calor

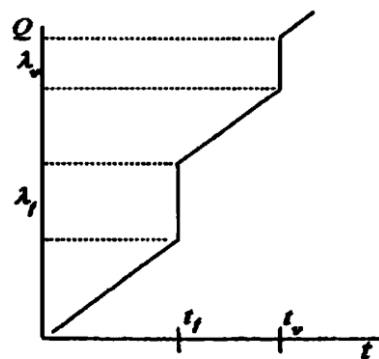
El calor es una forma de energía que cuantifica la diferencia que existe entre un estado inicial y final debido a un proceso que produce cambios en la energía interna de un cuerpo (CALLEN HERBERT, 1985, p.16), de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica el calor fluye de un

cuerpo con mayor energía a uno con menor energía (ÇENGEL, 2007, p.61) por lo que siempre que exista una diferencia de temperatura existirá flujo de calor.

En el instante en que consigue un equilibrio térmico entre los sistemas que se encuentran interactuando deja de existir la transferencia de calor. El calor puede presentarse en forma de calor latente y sensible, los mismos que se detallan a continuación:

2.1.2.1 *Calor sensible*: es calor necesario para elevar la temperatura del fluido sin que en este se produzca cambio en su estructura y por lo tanto no se produce un cambio de estado.

2.1.2.2 *Calor Latente*: es el término usado para designar al calor que produce un cambio en la fase de una sustancia pero no de la composición de la misma. Es un tipo de calor en el que no se percibe cambios de temperatura.



**Gráfico 1-2:** Diagrama calor vs temperatura

Fuente: Rodríguez, 1990, p.9

En la figura mostrada se observa que los tramos en los que la temperatura permanece constante son zonas donde se realizan los cambios de fase es decir son tramos de calor latente y en los tramos en los cuales la temperatura varía son las zonas de calor sensible. La ecuación que permite calcular el calor intercambiado durante un proceso que produzca cambio de fase de sólido a líquido en la sustancia según RODRIGUEZ (1990, p.9) es:

$$Q_f = m \cdot \lambda_f \quad (3)$$

Dónde:

$Q_f$  = Calor latente [kJ]

$m$  = masa [kg]

$\lambda_f = \text{Calor latente de fusión [kJ/kg]}$

### 2.1.3 *Propiedades de los fluidos refrigerantes.*

2.1.3.1 *Densidad* Es la propiedad de los fluidos que relaciona la masa de una sustancia con el respectivo volumen que ocupa esta sustancia, representándose esto en la siguiente ecuación:

$$\rho = m/V \quad (4)$$

Dónde:

$\rho = \text{Densidad [kg/m}^3\text{]}$

$m = \text{Masa [Kg]}$

$v = \text{Volumen [m}^3\text{]}$

Existen varios métodos para medir la densidad de una sustancia, pero para una rápida determinación se usa el instrumento llamado picnómetro el cual permite tener la medida de volumen fijo y se debe medir su masa para que mediante la ecuación 4 calcular la existe una relación entre el peso específico y de la densidad con el uso de la gravedad de la siguiente manera densidad (MOTT, 2006, p.12):

$$\gamma = \rho \times g \quad (5)$$

Dónde:

$\gamma$ : Peso específico de la salmuera [ $\text{N/m}^3$ ]

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

$g$ : Gravedad [ $\text{m/s}^2$ ]

2.1.3.2 *Viscosidad de los fluidos.* La viscosidad es una de las propiedades más importantes de un fluido que está relacionada con la capacidad de fluir de una sustancia, es una propiedad definida como la oposición de un fluido a fluir, esto debido a que existe fuerzas de cohesión que tratan de mantener las partículas de un fluido juntas, la viscosidad es una magnitud que expresa la deformación que sufre un fluido cuando se le aplican fuerzas externas.

A continuación se muestra la ecuación de Andrade para la obtención de la viscosidad en función de la temperatura (LAURENCIO y DELGADO, 2008, pp. 1-12).

$$\mu = A \cdot e^{b T} \quad (6)$$

Dónde:

$\mu$ : Viscosidad dinámica [Pa-s]

T: Temperatura [K]

A: Viscosidad infinita [1/P-s]

b: Coeficiente que depende del tipo de fluido [1/K]

De la ecuación anterior A y b son constantes que se deben evaluar de ensayos experimentales. La temperatura del fluido por ende controla el valor de viscosidad esto conlleva a que a mayor temperatura del fluido se contara con menor valor de viscosidad.

Para obtener el valor de viscosidad existe varios métodos que se detallan en la norma ASTM-D 445 (KISHORE NADKARNI, 2007, pp. 273-273). Existen dos tipos de viscosidades la viscosidad cinemática y la viscosidad dinámica o absoluta las mismas que se encuentran relacionadas por la densidad.

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

Dónde:

v: Viscosidad cinemática del petróleo crudo [m<sup>2</sup>-s]

$\mu$ : Viscosidad dinámica del petróleo crudo [Pa-s]

$\rho$ : Densidad [Kg/m<sup>3</sup>]

#### 2.1.4 *Curvas de enfriamientos*

El comportamiento de los fluidos secundarios puede detallarse en curvas de enfriamiento donde básicamente se encuentran caudales, temperaturas, tiempos y las etapas del enfriamiento. Pueden obtenerse curvas de enfriamiento para un mismo fluido a distintas concentraciones para observar el efecto que tiene la concentración de una solución en el proceso de refrigeración. En este proyecto se analizan tres tipos de curvas:

2.1.4.1 *Curva temperatura vs tiempo* En esta curva se observa la variación de temperatura en función del tiempo, además se puede notar la temperatura mínima que alcanza la solución ya que desde este punto se produce una menor transferencia de calor y la temperatura varía lentamente.

2.1.4.2 *Curva caudal vs tiempo* En esta gráfica se puede observar la influencia que tienen las propiedades de los fluidos como la densidad y la viscosidad al enfriarse y su afectación directa sobre el caudal que tiene el fluido, al incrementarse la densidad de un fluido se producen mayores pérdidas y el fluido es más difícil de impulsar por lo que se presenta una disminución del caudal lo que se puede observar en esta gráfica

2.1.4.3 *Curva velocidad de enfriamiento vs temperatura* Se obtiene de la extrapolación de datos de la temperatura y tiempo, esta gráfica muestra el efecto que tiene bajar la temperatura de un fluido también sus propiedades para la transferencia de calor también disminuyen.

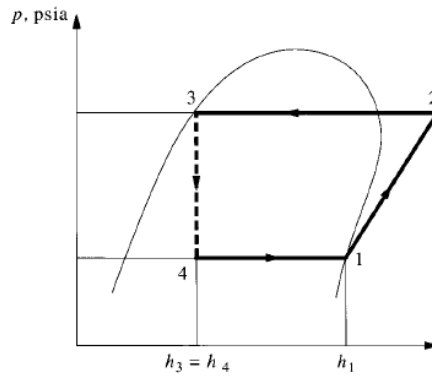
Es por tanto el objetivo de este trabajo la obtención de curvas de enfriamiento lo que permite comparar el comportamiento de la solución acuosa a base de propilenglicol con la salmuera de cloruro de calcio y determinar cuál es el fluido de mejor comportamiento en el equipo chiller.

## **2.2 Sistema de refrigeración por compresión de vapor**

Actualmente es el sistema de mayor uso en la refrigeración a nivel industrial, el refrigerante puede comprimirse en su fase de vapor y debido a sus características puede cambiar de vapor a líquido (RODRIGUEZ, 1990 p. 429), los equipos que funcionan con este sistema como el chiller están compuestos generalmente por un compresor, condensador, elemento de expansión y evaporador los mismos que realizan un determinado proceso.

Un proceso de refrigeración está relacionado con el cambio de las propiedades termodinámicas del refrigerante y de la transferencia de energía entre el refrigerante y el entorno (WANG, 2000, p.418). Cuando en el sistema ocurren una serie de procesos en el que las condiciones finales se igualan a las condiciones iniciales se trata de un ciclo cerrado, este ciclo funciona con la recirculación del refrigerante, por lo que el sistema de refrigeración por compresión de vapor trabaja como un ciclo cerrado.



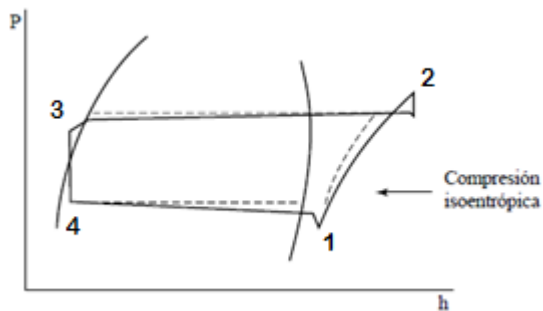


**Gráfico 2-2:** Diagrama P-h para la representación del ciclo estándar

Fuente: WANG, 2000, p.425

EL ciclo ideal de compresión de vapor está conformado los siguientes procesos: compresión isentrópica, condensación isobárica, expansión adiabática y evaporación isobárica, tal como se muestra en la Figura 2-1.

En la realidad el ciclo de refrigeración contiene recalentamientos, subenfriamientos, caídas de presión tanto en tramos de tubería así como en componentes del sistema (condensador y evaporador) y procesos politrópicos ya que no existen procesos netamente adiabáticos o reversibles, por lo que los procesos del ciclo real de refrigeración por compresión de vapor adoptan la forma del siguiente diagrama.



**Gráfico 3-2:** Diagrama P-h correspondiente al ciclo real

Fuente: FRANCO LIJÓ, 2006, p.27

### 2.2.1 *Proceso de compresión*

En este proceso se realiza la elevación de la presión y temperatura del fluido refrigerante, en el que el refrigerante entra al compresor como vapor saturado o vapor recalentado correspondiente al estado 1, para luego ser comprimido a un estado de elevada presión y temperatura correspondiente al estado 2, el proceso real es un proceso politrópico es decir un proceso en el

que se produce cambios en la entropía, por lo que se necesita un factor de eficiencia que permita calcular el trabajo real del compresor considerando la generación de entropía.

### 2.2.2 *Proceso de condensación*

El proceso de condensado inicia con el enfriamiento del vapor hasta la temperatura de condensación mediante un rechazo de calor sensible, logrando obtener de este modo vapor saturado, el mismo que cede calor latente a temperatura constante hasta conseguir un cambio de estado a líquido saturado.

De acuerdo con las características del condensador que es el componente previsto para realizar este proceso se puede continuar hasta producir un subenfriamiento en el refrigerante como se muestra en la figura 3-1. El calor que cedido por el refrigerante en el condensador es igual a la suma del calor total suministrado por el compresor y al calor absorbido del medio de enfriamiento en el evaporador.

### 2.2.3 *Proceso de expansión*

El objetivo de este proceso es obtener vapor a baja presión y temperatura mediante la estrangulación del flujo del refrigerante, proceso que se puede observar entre los estados 3 y 4 de la figura 3-2. Las condiciones de baja presión y temperatura son las requeridas para que el refrigerante entre en el evaporador.

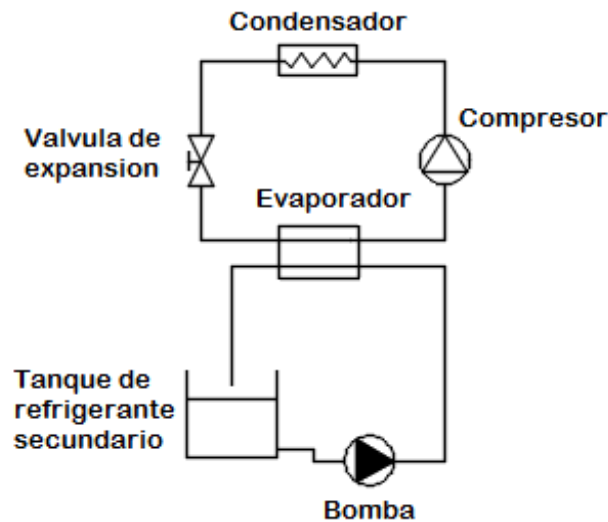
### 2.2.4 *Proceso de evaporación*

Este proceso produce el cambio de fase en el refrigerante hasta llegar a vapor saturado, debido a la admisión de calor del medio que se está enfriando. Este proceso se realiza a presión constante, aunque a medida que el fluido pase por el interior del evaporador se producirán pérdidas por rozamiento. Dependiendo de las características del evaporador, tuberías y válvula de expansión se puede conseguir un recalentamiento que consiste en suministrar calor adicional al vapor saturado para llevar su temperatura y conseguir vapor recalentado.

## **2.3 Equipo de refrigeración chiller**

Es un equipo de refrigeración industrial, que trabaja como un sistema de refrigeración indirecto, ya que el refrigerante no está en contacto directo con el proceso, por lo que el refrigerante enfría a otro fluido que está en contacto con el proceso, este fluido generalmente es agua de ahí que se

conoce al chiller como planta enfriadora de agua. Cuando se requieran enfriamientos por debajo del 0°C se utiliza las salmueras para esta aplicación.



**Figura 1-2:** Elementos principales del chiller

Realizado por: Autores

Los principales componentes del chiller son el compresor, condensador, válvula de expansión, evaporador y bomba que bombea el fluido enfriado por el proceso. A continuación se detallan los elementos principales del chiller perteneciente al Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, este equipo además cuenta con un sistema de adquisición de datos para facilitar la toma y análisis de datos en el desarrollo de pruebas experimentales.

### 2.3.1 Sistema de adquisición de datos

Este sistema está formado por la tarjeta My-DAQ, dos sensores para tomar datos de temperatura y caudal y el programa en el software LabView el mismo que almacena datos de temperatura y caudal en tiempo real en una tabla de Excel cada 5 minutos hasta concluir la prueba, esto permite tener una interfaz entre el equipo y el operador.

2.3.1.1 *Sensor de temperatura* La temperatura de la salmuera en el tanque es medida por un termistor NTC el mismo que basa su funcionamiento variando la resistencia, al aumentar la temperatura la resistencia del material del termistor disminuye de manera no lineal siguiendo la siguiente ecuación exponencial:

$$R_T = R_o \cdot e^{\left[\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right]} \quad (8)$$

Dónde:

$T_0$ : Temperatura de referencia [K]

$T$ : Temperatura a medir [K]

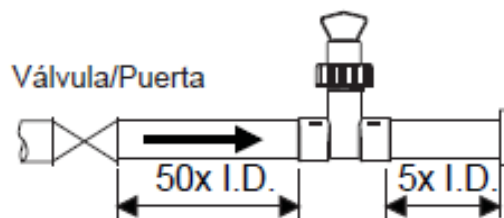
$R_0$ : Resistencia a la temperatura  $T_0$  [ $\Omega$ ]

$R_T$ : Resistencia a la temperatura  $T$  [ $\Omega$ ]

$\beta$ : Constante característica del termistor NTC [K]

2.3.1.2 *Caudal* El caudal de circulación del refrigerante secundario es medido mediante un sensor de flujo tipo paletas el mismo que tiene un margen de velocidades de 0,3 a 6 m/s, y número de Reynolds mínimo de 4500 para su correcto funcionamiento.

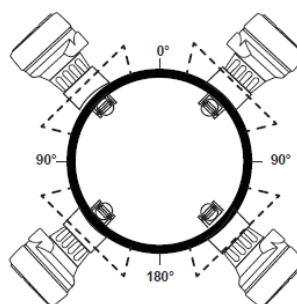
Para una efectiva toma de datos es necesario verificar que la ubicación y disposición del sensor se encuentre como lo indica el fabricante, con la finalidad de que se desarrolle completamente el perfil de velocidades y que el instrumento realice la correcta medición se debe considerar la distancia de accesorios antes y después del sensor.



**Figura 2-2:** Distancia para la ubicación del instrumento

Fuente: ([http://www.gfps.com/country\\_US/en\\_US/products/sensors/flow-sensors/515.html](http://www.gfps.com/country_US/en_US/products/sensors/flow-sensors/515.html).)

Para evitar problemas de desgaste excesivo del rotor, y efectos negativos por sedimentaciones y bolsas de aire se recomienda que el sensor se coloque como se muestra en la figura



**Figura 3-2:** Disposición del sensor en la tubería

Fuente: ([http://www.gfps.com/country\\_US/en\\_US/products/sensors/flow-sensors/515.html](http://www.gfps.com/country_US/en_US/products/sensors/flow-sensors/515.html).)

### 2.3.2 Compresor hermético

El compresor es una maquina térmica que en el sistema de refrigeración succiona el fluido refrigerante a baja presión y temperatura, lo comprime y descarga a una presión y temperatura tales que se pueda condensar, (FRANCO LIJÓ, 2006 p. 33) es decir el vapor sale del compresor en estado de vapor sobrecalentado. Entre los datos necesarios para realizar cálculos acerca del compresor, es necesario conocer la relación de compresión que viene dado por la siguiente ecuación:

$$r_p = \frac{\text{Presión descarga}}{\text{Presión aspiracion}} \quad (9)$$

Cabe recalcar que las dos presiones son absolutas y que para este tipo de compresores el máximo valor de la relación de compresión es 7, la relación de compresión es el parámetro que determina el funcionamiento del compresor. El trabajo politrópico del compresor puede cuantificarse mediante la diferencias de entalpias del fluido de trabajo a la entrada y a la salida del compresor

$$w_{ico} = \Delta h = h_f - h_o \quad (10)$$

Dónde:

$w_{ico}$ : Trabajo del compresor

$h_o$ : Etanlpia a la entrada del compresor

$h_f$ : Etanlpia a la salida del compresor

Este trabajo calculado mediante la ecuación anterior es el necesario para cumplir con los requerimientos del ciclo térmico real, pero debido a pérdidas por fricción en los elementos mecánicos del compresor se necesita mayor cantidad de trabajo en el eje para realizar este proceso, por lo que se utiliza un factor de rendimiento mecánico que aproximadamente puede ser de 0,9 (DÍAZ BONIFÁZ, 2011, p.175), esto se lo representa en la siguiente ecuación:

$$\eta_{mec} = \frac{w_{ico}}{w_{eco}} \quad (11)$$

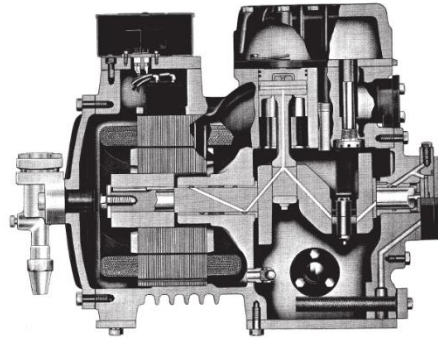
Dónde:

$\eta_{mec}$ : Rendimiento mecanico del compresor

$w_{ico}$ : Trabajo real politrópico [kJ/kg]

$w_{eco}$ : Trabajo en el eje [kJ/kg]

El compresor hermético instalado en el chiller es un compresor recíprocante, sus principales componentes para realizar el proceso de compresión son: pistón, motor, cilindro y válvulas, una de succión y de descarga. La compresión se realiza debido a la reducción de volumen produciéndose así un aumento de presión y temperatura del vapor.



**Figura 4-2:** Vista de sesión del compresor hermético

Fuente: COPELAND, 1967, p.3

El compresor hermético tiene aplicaciones en sistemas de baja potencia de refrigeración y acondicionamiento de aire, en este tipo de compresores el motor y el compresor se encuentran acoplados de manera directa y todo el conjunto se encuentra montado en una misma carcasa que externamente es soldada garantizando así su hermeticidad (COPELAND, 1967, pp.1-2), evitando así problemas de montaje y alineación.

El funcionamiento de un compresor está influenciada por el tipo de refrigerante con el que vaya a trabajar, ya que el mismo no debe ser corrosivo para los materiales del motor y además el motor debe trabajar de acuerdo con las características del refrigerante para de esta manera evitar inconvenientes con sobrecarga.

### 2.3.3 *Condensador enfriado por aire.*

Es un intercambiador de calor, en el cual el calor del vapor refrigerante pasa a través de las paredes del condensador y como resultado de esta pérdida de calor hacia el medio el vapor refrigerante es primero enfriado hasta su saturación y luego condensado hasta su fase de estado líquido (DOSSAT, 1990, p.315). Las características de los fluidos y de la pared del condensador y adicionalmente la diferencia de temperatura son factores que determina la cantidad de calor transferido como se muestra en la ecuación siguiente según (ÇENGEL, 2007, p.62)

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T \quad (12)$$

Dónde:

Q: Calor transferido [W]

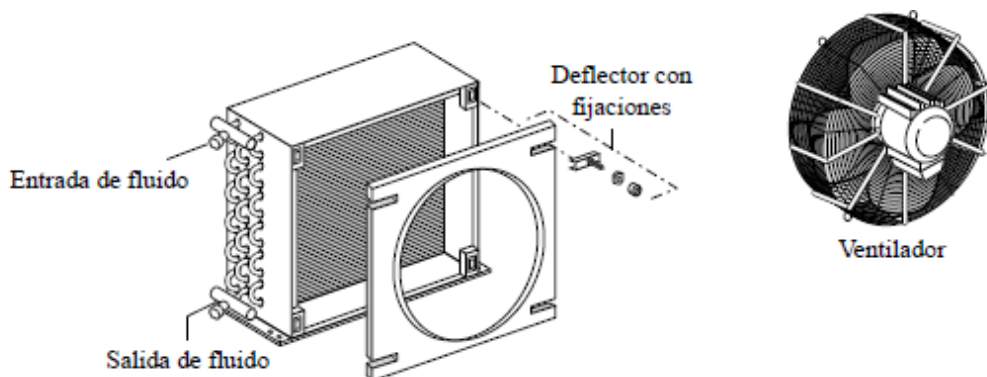
A: Superficie total de transferencia de calor [m<sup>2</sup>]

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

ΔT: Diferencia de temperatura entre refrigerante y medio condensante [°C]

Las propiedades del fluido de enfriamiento influye sobre el coeficiente global de transferencia de calor y este a su vez en la transferencia de calor, por lo que dependiendo del medio condensante se tiene tres tipos de condensadores: condensador enfriado por aire, enfriados por agua y evaporativo (enfriado por aire y agua), para cada uno estos tipos de condensadores se debe realizar una correcta selección de materiales tomando en cuenta las propiedades del refrigerante y del medio condensante.

En condensadores enfriados por aire la condensación depende directamente de la temperatura ambiente, este condensador posee un ventilador ubicado aguas abajo lo que hace que exista un flujo forzado de aire. El refrigerante circula por una serie de tubos con aletas y externamente circula el flujo de aire, es necesario que en los tubos y aletas no exista una acumulación de polvos e impurezas ya que esto implica que disminuye la eficiencia del condensador.



**Figura 5-2:** Condensador enfriado por aire

Fuente: FRANCO LIJÓ, 2006, p.86

En ocasiones el condensador puede encontrarse montado en un solo bastidor con el compresor conociéndose este conjunto como unidad condensadora.

El aire que circula por el condensador incrementa su temperatura alrededor de 8°C, y la diferencia terminal entre la temperatura de condensación y la temperatura salida del aire está determinada en 7 °C, por lo cual la temperatura de condensación es 15 °C superior a la temperatura en la entrada del aire. (FRANCO LIJÓ, 2006, p.86)

$$T_c = T_e + 15^\circ C \quad (13)$$

Dónde:

T<sub>c</sub>: temperatura de condensación [°C]

T<sub>e</sub>: temperatura de entrada del aire [°C]

Para una óptima transferencia de calor en el equipo y alargar su vida útil se recomienda que la velocidad del aire se encuentre entre los 2.5 a 5 metros por segundo (DOSSAT, 1986, p. 322), para calcular esta velocidad se aplica la siguiente formula:

$$v_a = \frac{q_a}{A} \quad (14)$$

Dónde:

v<sub>a</sub>: Velocidad del aire [m/s]

q<sub>a</sub>: Caudal de aire [m<sup>3</sup>/s]

A: Área de circulación del aire [m<sup>2</sup>]

#### 2.3.4 *Válvula de expansión termostática.*

Entre las principales funciones de la válvula de expansión esta producir la caída de presión entre el lado de alta y de baja presión para producir la expansión del refrigerante, además la válvula es la encargada de regular el flujo de refrigerante que va hacia el evaporador para asegurar un correcto funcionamiento del sistema y compensar la carga en el evaporador.

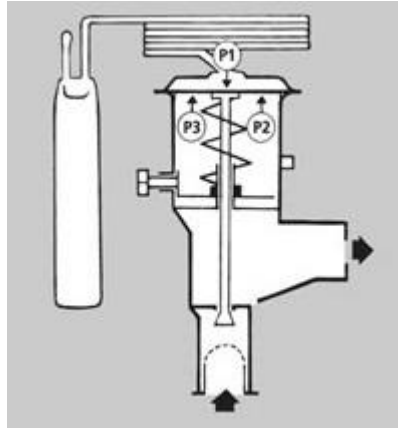
Una de las válvulas más utilizadas en sistemas de refrigeración y de aire acondicionado es la válvula termostática ya que esta mantiene el vapor que sale del evaporador a un grado de recalentamiento constante, es decir mantiene al vapor a una temperatura fija, entre sus principales elementos se encuentra el cuerpo de válvula (asiento y aguja), muelle, diafragma y bulbo sensor.

Para entrar el fluido a la válvula de expansión debe estar en estado líquido a la temperatura de condensación o subenfriado, luego de la expansión se formara mezcla de líquido y vapor; pero



debe existir mayor proporción de líquido que vapor. Con la finalidad de obtener una alta eficiencia se debe ubicar muy cercana al evaporador

El bulbo al estar en la salida del evaporador y montado sobre la tubería censa la temperatura del vapor que sale y dependiendo del valor que tenga la temperatura varia la presión en el diafragma.



**Figura 6-2:** Elementos de una válvula de expansión termostática

Fuente: (<https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2008/02/valvulas-de-expansion-funcionamiento-y-seleccion-de-la-adecuada/>)

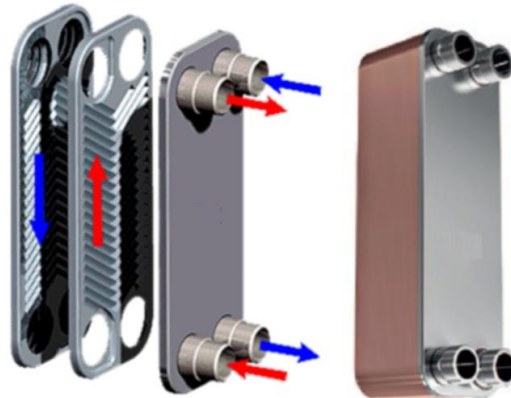
Como se indica en la figura mostrada la válvula trabaja bajo la acción de tres presiones, F2 presión que ejerce el muelle sobre el diafragma, F3 presión del evaporador y F! que es la presión a la que se encuentra el bulbo. Pr y Pe se encuentra en el mismo sentido y hacen que la válvula se cierre, mientras que Pb hace que la válvula se abra, por lo tanto la apertura y cierre de la válvula estará controlada por la temperatura a la salida del evaporador ya que esta temperatura hace variar la presión en el bulbo

### 2.3.5 Evaporador de placas

Es un intercambiador de calor que absorbe calor latente de un medio de enfriamiento que para el caso de sistemas de enfriamiento como el chiller dicho fluido puede ser agua o algún tipo de salmuera y en el que generalmente se utiliza evaporadores de placas.

Está formado por varias placas dispuestas en un bastidor, las placas cuentan con pliegues en su superficie haciéndola más rígida y direccionando el flujo, para evaporadores de gran capacidad las placas se encuentran soldadas por pares y se sujetan al bastidor mediante pernos.

Debido a su facilidad de desmontaje este tipo de evaporadores son muy utilizados en sistemas de refrigeración de plantas industriales alimenticias ya que se puede llevar un gran control de la higiene de las placas y evitar contaminación de los alimentos.



**Figura 7-2:** Evaporador de placas

Fuente: ([https://www.tiendafriguscenter.com/detalles\\_Intercambiadores-de-Calor](https://www.tiendafriguscenter.com/detalles_Intercambiadores-de-Calor))

Como se muestra en la figura el refrigerante circula entre dos placas soldadas y el medio de enfriamiento circula por el espacio entre dos pares de placas, realizándose la transferencia de calor entre el refrigerante y el medio de enfriamiento.

### 2.3.6 Bomba centrífuga

Este es el componente encargado de impulsar y mantener la recirculación continua del medio de enfriamiento en este caso de la salmuera hacia el proceso, para un adecuado funcionamiento del equipo chiller se debe contar con una apropiada potencia de bombeo ya que a medida que el refrigerante se enfría en este se produce un incremento de la viscosidad por lo que se requerirá mayor potencia para impulsar el fluido.

La potencia requerida para bombear un medio de enfriamiento como agua o cualquier salmuera está dada por la siguiente ecuación (CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY, 1980, p.4-23).

$$P = \frac{Q \times H_{man} \times \gamma}{1000 \times \eta} \quad (15)$$

Dónde:

P: Potencia de bombeo [W]

Q: Caudal [l/s]

$H_{man}$ : Altura manométrica [m]

$\gamma$ : Peso específico de la salmuera [ $N/m^3$ ]

$\eta$ : Rendimiento [–]

La altura manométrica es una medida que resulta de sumar la altura de cabeza de bombeo, las longitudes equivalentes de cada accesorio y las pérdidas por rozamiento en tubería del sistema de bombeo. Para el cálculo de las pérdidas por rozamiento es necesario utilizar la ecuación de Darcy Weisback:

$$H_{rp} = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (16)$$

Dónde:

$H_{rp}$ : Pérdida por rozamiento [m]

f: Coeficiente de fricción [–]

L: Longitud de tubería [m]

D: Diámetro de tubería [m]

v: Velocidad del fluido [m/s]

g: Gravedad [ $m/s^2$ ]

El coeficiente de fricción se puede obtener del diagrama de Moody o de ecuaciones empíricas como la ecuación de Fanno, el coeficiente de rozamiento está en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa, a su vez el número de Reynolds depende de la viscosidad del fluido.

Debido a características de los fluidos en estado líquido se conoce que la viscosidad de las salmueras aumenta al disminuir la temperatura por lo tanto al incrementarse la viscosidad análogamente aumenta la pérdida por rozamiento haciendo que a medida que se enfríe la salmuera se necesita mayor potencia de bombeo.

## **2.4 Criterios de análisis y evaluación de sistemas de refrigeración**

### *2.4.1 Efecto de refrigeración y carga de refrigeración.*

El efecto de refrigeración se define como la cantidad de calor por unidad de masa extraída por el refrigerante en el evaporador (WANG, 2000, p.427-428), se calcula de la siguiente manera:

$$q_{rf} = h_{lv} - h_{en} \quad (17)$$

Dónde:

ER: Efecto de refrigeración [KJ/Kg]

$h_{en}$ : Entalpia a la entrada del evaporador [KJ/Kg]

$h_{lv}$ : Entalpia a la salida del evaporador [KJ/Kg]

La carga de refrigeración es la velocidad con la que extrae calor el refrigerador en el evaporador, es una propiedad extensiva y depende del flujo másico del refrigerante, de la siguiente manera:

$$Q_{rl} = \dot{m}_r \times ER \quad (18)$$

Dónde:

$Q_{rl}$ : Carga de refrigeración [W]

$\dot{m}_r$ : flujo masico de refrigerante [Kg/s]

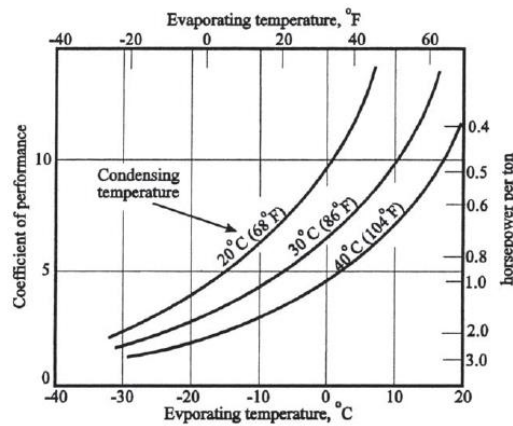
ER: Efecto de refrigeración [KJ/Kg]

#### 2.4.2 *Coficiente de rendimiento*

La eficiencia para un ciclo de refrigeración se define como la cantidad de energía requerida dividida para lo cantidad de energía necesaria para conseguir la cantidad requerida (STOECKER, 1998, p. 112), la cantidad requerida es la refrigeración. Esta eficiencia es conocida como el Coeficiente de Performance y por sus siglas se define como COP.

$$COP = \frac{\text{Efecto de refrigeración}}{\text{Trabajo que entra (trabajo del compresor)}} \quad (19)$$

El COP es un indicador del funcionamiento del ciclo térmico de refrigeración. Sus valores pueden ser mayor que 1 por lo que no es un rendimiento térmico. Este coeficiente se incrementa si la temperatura de evaporación se incrementa y decrece cuando la temperatura de condensación se incrementa. Esto se puede notar en la siguiente figura.



**Gráfico 4-2:** Variación del COP con la temperatura de evaporación

Fuente: STOECKER, 1998, p.113

#### 2.4.3 Caballos fuerza por tonelada de refrigeración.

El COP es un término muy utilizado en el análisis y diseño de sistemas de refrigeración y se lo puede relacionar con los caballos fuerza y las toneladas de refrigeración (STOECKER, 1998, p. 113) mediante la siguiente relación:

$$\frac{HP}{TR} = \frac{4.715}{COP} \quad (20)$$

Dónde:

HP: Caballos fuerza

TR: Toneladas de refrigeración

COP: Coeficiente de performance

En equipos de origen de Estados Unidos es común encontrar la medida de eficiencia mediante la relación Caballos Fuerza por Tonelada de Refrigeración en este caso esta medición se la puede transformar fácilmente a términos de COP y conocer el funcionamiento del sistema de refrigeración.

#### 2.5 Medios de enfriamiento en equipos chiller.

En este tipo de equipos el refrigerante primario o fluido de trabajo del ciclo de refrigeración enfría a un fluido secundario para transportar el efecto de refrigeración entre la planta central y sus terminales. En plantas de refrigeración grandes es más económico utilizar un medio refrigerante

que se pueda bombear a lugares remotos en el cual se requiera enfriamiento, conociéndose a este como un refrigerante secundario (WANG, 2000, p.405).

Este medio de enfriamiento debe mantenerse en fase líquida y poseer aceptables propiedades termo-físicas y dependiendo de la aplicación se debe analizar su toxicidad, inflamabilidad, corrosión y costo. Debido a sus propiedades el agua es el mejor refrigerante secundario pero para aplicaciones donde se requiera temperaturas menores del punto de congelación del agua se usa soluciones no acuosas y acuosas.

Entre las soluciones no acuosas comúnmente usados como refrigerante secundario se encuentran los hidrocarburos y halocarburos fluorados y clorados los mismos que son de costo elevado y se utilizan en servicios de baja temperatura inferior a  $-40^{\circ}\text{C}$ . (CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY, 1980, p.390)

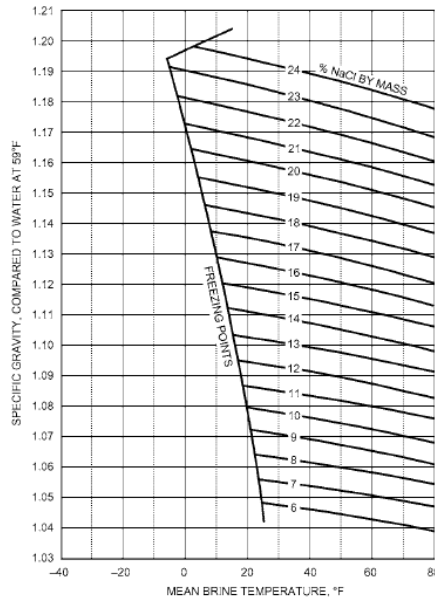
Las soluciones acuosas son una mezcla de agua y soluto a distintas concentraciones. Para el caso de refrigerantes secundarios el soluto es un anticongelante, en el cual el punto de congelación de la solución depende de la concentración de la mezcla, mientras mayor sea la concentración de soluto se tiene menores temperaturas de congelación, esto sucede hasta llegar a una temperatura mínima de congelación formándose así una mezcla eutéctica, a partir de este punto al aumentar la concentración de soluto se incrementara también la temperatura de congelación.

El soluto tiene como base compuestos inorgánicos u orgánicos que tienen propiedades de anticongelantes. Entre los anticongelantes de origen inorgánico se encuentran los compuestos con base cloruro, mientras que los de origen orgánico son con base alcohol o glicol.

#### 2.5.1 *Anticongelantes con base cloruro.*

Los anticongelantes con base cloruro más utilizados son cloruro de sodio y cloruro de calcio los mismos que en una mezcla con agua se conocen como salmuera. La salmuera de cloruro de calcio y cloruro de sodio probablemente son los refrigerantes de más bajo costo actualmente.

2.5.1.1 *Cloruro de sodio.* Posee buenas propiedades termodinámicas y baja toxicidad por lo que puede estar en contacto con alimentos, con la desventaja de ser altamente corrosivo y que su punto de congelación es relativamente elevado en comparación con otros refrigerantes secundarios como se observa en la siguiente gráfica, siendo esta temperatura aproximadamente de  $-20^{\circ}\text{C}$  (CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY, 1980, p. 389)..



**Gráfico 5-2:** Gravedad específica de la salmuera de cloruro de sodio.

Fuente: ASHRAE, 2009, p.775

2.5.1.2 *Cloruro de calcio.* Es un refrigerante de grado industrial, muy utilizado debido a que tiene una temperatura de congelación menor que la salmuera de cloruro de sodio, siendo esta temperatura aproximadamente  $-55^{\circ}\text{C}$ , esta salmuera no es toxica pero no se recomienda su contacto directo con alimentos que no son herméticamente cerrado a diferencia de la salmuera de cloruro de sodio, este anticongelante resulta ser no compatible para aplicaciones con acero inoxidable ya que es posible que se produzca corrosión (IGNATOWICZ, 2008, p. 69).

### 2.5.2 *Anticongelantes con base alcohol.*

El metanol y etanol funcionan como anticongelantes y se usa en estado puro o en soluciones acuosas dependiendo de la temperatura de congelación que se quiera obtener. Son incoloros y su principal inconveniente es que son inflamables, necesita de un inhibidor de la corrosión.

2.5.2.1 *Metanol* es un refrigerante secundario ampliamente utilizado en las industrias química y farmacéutica. La principal desventaja del metanol es su toxicidad, que lo hace más dañino que el etilenglicol. Su uso suele ser limitado para procesar aplicaciones en las cuales se encuentran disponibles operadores y técnicos capacitados. (STOECKER, 1998, p.666)

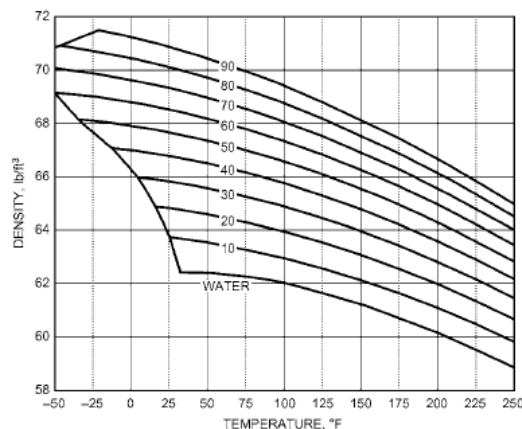
2.5.2.2 *Etanol* tiene la ventaja de no ser toxico por lo cual es utilizado en la industria farmacéutica y en la fabricación de bebidas alcohólicas, pero sus propiedades térmicas son menos favorables que las propiedades del metanol y de manera similar a este anticongelante también son inflamables por lo que su uso está restringido a industrias y plantas en las que se cuente con un

sistema de seguridad contra incendios (CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY, 1980, p. 389).

### 2.5.3 Anticongelantes con base glicol.

2.5.3.1 *Etilenglicol* Tiene numerosas aplicaciones industriales y comerciales. El mejor uso es en mezclas anticongelantes y líquidos de refrigeración. Es también usado en aeropuertos como fluido de deshielo, fluido de frenos hidráulicos, pesticidas, adhesivos y fluidos de transferencia de calor en algunos sistemas de energía solar.

El etilenglicol necesita de un adecuado inhibidor de la corrosión para asegurar la conservación de los sistemas. Etilenglicol tiene efectos de intoxicación en el sistema nervioso central que puede llevar a una ataxia, sedación, coma y paro respiratorio similar a una intoxicación con etanol. (WEXLER, 2014, p. 2:525),



**Gráfico 6-2:** Densidad de la solución de a base de etilenglicol.

Fuente: ASHRAE, 2009, p.778

El etilenglicol necesita de una mayor concentración para llegar a temperaturas similares a la de salmueras de cloruro de calcio y puede trabajar a temperaturas menores de  $-40^{\circ}\text{C}$  llegando hasta los  $-50^{\circ}\text{C}$  pero debido al incremento de la viscosidad al bajar su temperatura es más usado a temperaturas relativamente altas alrededor de los  $-10^{\circ}\text{C}$ .

2.5.3.2 *Propilenglicol* Es un fluido soluble en agua que es considerado seguro para usar en alimentos, medicamentos y cosméticos. Sus atractivas propiedades como solvente, humectante, anticongelante combinado con su relativo bajo nivel de toxicidad, han dirigido su extensa utilización en un largo número de productos industriales y comerciales. La FDA clasifica al propilenglicol como un aditivo que es generalmente reconocido como seguro para su uso en



alimentos. Propilenglicol es comúnmente el mejor constituyente de anticongelantes y líquidos de deshielo de carros, aviones y barcos. (WEXLER, 2014, pp. 3766-3767)

La temperatura mínima de congelación es de  $-51^{\circ}\text{C}$  (STOECKER, 1998, p.662) pero presenta el mismo inconveniente que el etilenglicol que al incrementar su concentración y disminuir su temperatura aumenta la viscosidad lo que involucra mayor pérdida y a su vez se requiere mayor potencia de bombeo, por lo que generalmente se usa a temperaturas de alrededor de  $-15^{\circ}\text{C}$ .

#### 2.5.4 Refrigerante con base amoníaco amoníaco

El amoníaco posee excelentes propiedades térmicas, es miscible con agua pero al mezclarse con agua disminuye su eficiencia, tiene el inconveniente de que al vaporizarse una mezcla de aire amoníaco resulta inflamable, por lo que el sitio en donde se utilice amoníaco deberá poseer un correcto sistema de ventilación y sistema contra incendios, su baja temperatura de ebullición hace que el amoníaco se utilice en aplicaciones de muy baja temperatura y sistemas cerrados (ASHRAE, 2010 p. 66) ya que a temperatura ambiente el amoníaco se encuentra en estado gaseoso.

Debido a que el objetivo de este trabajo es obtener una eficiencia energética se debe utilizar un refrigerante secundario se permita cumplir con este objetivo, de acuerdo con el manual Fundamentals (ASHRAE, 2009 p. 218) se considera a la solución de propilenglicol como la solución que menos energía consume al ser impulsado.

**Tabla 1-2** Factor de consumo de energía

Refrigerante secundario	Factor de energía
Agua-Amoníaco	1
Metanol	1,078
Propilenglicol	1,142
Etilenglicol	1,25
Cloruro de sodio	1,295
Cloruro de calcio	1,447
d-Limoneno	2,406
Cloruro de Metileno	3,735

Fuente: ASHRAE, 2009, p. 218

Del análisis de las propiedades de los refrigerantes secundarios más utilizados en aplicaciones industriales se concluye que el propilenglicol tienen propiedades favorables respecto a no

toxicidad y propiedades térmicas como poseer bajo punto de congelación al igual que la salmuera de cloruro de calcio por lo que mediante análisis de datos de las pruebas experimentales se puede determinar cuál refrigerante posee mejor comportamiento en el equipo chiller.

Con el análisis bibliográfico mostrado en este capítulo se cuenta con material para entender el proceso de refrigeración, el funcionamiento del equipo chiller e información de los fluidos secundarios lo que permite diseñar el experimento y tener una metodología para el desarrollo correcto de este trabajo.

## CAPÍTULO III

### 3 FASE EXPERIMENTAL.

#### 3.1 Determinación del estado técnico del equipo chiller.

El estado técnico de las instalaciones o elementos de un sistema de refrigeración afectan al correcto funcionamiento de las instalaciones con gran impacto en los costos económicos y puede también afectar a la integridad de las personas que trabajan con ellas (FRANCO LIJÓ, 2006, p.185), por tal motivo antes de poner en marcha cualquier tipo de sistema se debe evaluar su estado técnico tomando en cuenta los principales parámetros de la evaluación de un activo como la inspección visual, análisis del medio ambiente de trabajo, pruebas y mediciones..

##### 3.1.1 *Inspección visual.*

La inspección visual se realiza con la finalidad de encontrar y corregir anomalías visibles a simple vista en el equipo chiller ya sea en los componentes como la unidad condensadora, sistema de bombeo, tablero de control, tuberías y conexiones eléctricas. Entre las actividades realizadas en la fase de inspección visual se encuentran las siguientes:

Limpieza completa de las superficies externas de los elementos del equipo chiller tales como la unidad condensadora, evaporador y superficies externas del tanque de almacenamiento del fluido secundario, además debido al ambiente corrosivo debido a la salmuera se necesitó de final lijas para realizar la limpieza en las superficies interiores.

Revisión y ajuste de las conexiones eléctricas y revisión del estado de los cables conductores, comprobación de la continuidad en los cables de los sensores con la finalidad de asegurar la transferencia de datos entre el sensor y la tarjeta de adquisición de datos, debido al alto requerimiento de corriente del motor de accionamiento de la válvula se procedió a implementar una fuente externa para la alimentación del motor y evitar daños en el circuito impreso y tarjeta de adquisición de datos.

Revisión del sistemas de bombeo del refrigerante secundario en el cual no se encontró la presencia de fugas, pero debido a la existencia de deterioro del aislamiento se procedió a realizar el re-aislamiento de las líneas con la finalidad de evitar transferencia de calor entre el fluido transportado y le medio circundante.



**Figura 1-3:** Estado final de las tuberías luego del re-aislamiento

Realizado por: Autores

Verificación del nivel de aceite del compresor mediante el chequeo en la mirilla de este equipo en el cual se comprobó que la cantidad de aceite es el adecuado, esto se realizó tanto cuando el equipo se encontró en reposo y luego en funcionamiento.



**Figura 2-3:** Mirilla para comprobar el nivel de aceite en el compresor

Realizado por: Autores

### 3.1.2 *Análisis del medio ambiente de trabajo.*

Entre los principales requerimientos de entorno que se deben tomar en cuenta para el correcto funcionamiento del equipo chiller se encuentra contar con el suficiente espacio para facilitar el flujo de aire por la unidad condensadora y que exista la menor cantidad de polvos y partículas en el sitio ya que de esta manera se asegura un correcto funcionamiento de este elemento del equipo chiller, además se debe asegurar que no exista un ambiente corrosivo que pueda afectar a las superficies del equipo chiller.

Los materiales de los componentes del chiller que se encuentran en contacto con el refrigerante secundario se deben analizar para determinar si los mismos son compatibles con el nuevo refrigerante secundario a base de Propilenglicol. Entre los materiales encontrados en el sistema de bombeo que se encuentran en contacto con el fluido en mencionó están los listados continuación:

**Tabla 1-3:** Materiales del equipo chiller que se encuentran en contacto con el propilenglicol

Elemento	Material
Válvula de pie.	Bronce
Canastilla de válvula.	Acero Inoxidable
Tubería de conducción	Polipropileno
Accesorios del sistema de conducción	Polipropileno
Intercambiador de calor	Acero Inoxidable
Paletas del caudalímetro	Polifluoruro de vinilideno
Rotor del sensor	Titanio
Rodete de bomba	Polipropileno
Tanque de almacenamiento	Acero Inoxidable

Realizado por: Autores

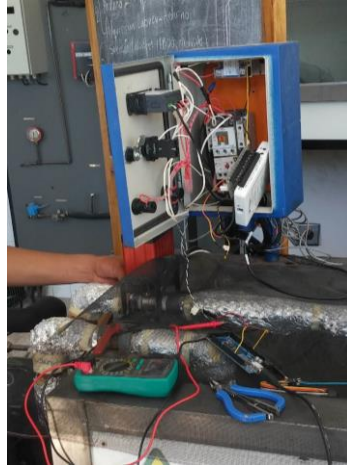
De los materiales listados todos son compatibles (IGNATOWICZ, 2008, p. 69) para entrar en contacto con el propilenglicol sin producirse problemas de incompatibilidad del material y el anticongelante por lo que no se realizó un recambio de algún elemento del equipo chiller.

### 3.1.3 Pruebas y mediciones.

Antes de poner en marcha al equipo se procede a verificar la continuidad de los conductores de los sensores NTC con mediante la utilización de un multímetro que permite verificar la continuidad, una vez analizado los criterios anteriores se procede a poner en marcha el equipo para observar el arranque y toma de fuerza del mismo con los siguientes resultados:

El compresor y la bomba de la impulsión de la salmuera arrancan de manera correcta, no se presentaron anomalías referentes a vibraciones en la unidad condensadora ni ruidos extraños en el funcionamiento de todo el equipo y además no se observa recalentamientos del condensador de la bomba.

Respecto al sensor NTC es posible realizar un evaluación cuantitativa del estado del mismo mediante la toma de la medida de resistencia a la temperatura de 20°C en cual se obtuvo un valor aproximado de 12kΩ siendo este valor el correspondiente para la NTC con un valor  $\beta$  igual a 3760 dado por el fabricante para el sensor que va conectado al divisor de voltaje que posteriormente se utiliza en la tarjeta My-DAQ, se verifico que efectivamente los valores mostrados por el software son los mismo valores que muestra el controlador de temperatura.



**Figura 3-3:** Comprobación del funcionamiento de sensores

Realizado por: Autores

En el caso del sensor de flujo se realizó una comprobación cualitativa en la que se verificó que el sensor no emita pulsos cuando la bomba está apagada y se verificó la presencia de voltaje cuando la bomba entra en funcionamiento.

Con el uso de una pinza amperimétrica se realizó la toma de datos de la corriente con la que trabajó la unidad condensadora, esta actividad se realizó con la finalidad de comparar con los datos de la placa y además para comprobar la carga de la unidad condensadora de una manera práctica por lo que se tomó el dato de corriente de la línea de trabajo siendo este valor de 13,4A, deduciéndose así que no existe un comportamiento extraño en la puesta en marcha del equipo y que la carga del gas refrigerante se encuentra en la cantidad recomendada por lo que no necesita de recarga del refrigerante.

Estas pruebas también mostraron el estado de todos los elementos del equipo chiller, tanto de la unidad condensadora y del sistema de adquisición de datos, se procedió a tomar datos de la presión y temperatura en la unidad condensadora tanto en el lado de alta y en el lado de baja presión, mediante la utilización de un puente de manómetros, mostrándose los datos a continuación:

**Tabla 2-3:** Presiones manométricas en la unidad condensadora

Tiempo [min]	Presión Baja [Psi]	Presión Alta [Psi]
10	43	202
20	43	202
30	43	202

Realizado por: Autores



**Figura 4-3:** Toma de datos de presiones de funcionamiento del compresor.

Realizado por: Autores

Los datos tomados fueron transformados a presiones absolutas para encontrar la relación de compresión y determinar los estados en el diagrama de Mollier:

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} \quad (21)$$

Dónde:

$P_{abs}$ : Presión absoluta [Psi]

$P_{man}$ : Presión manométrica [Psi]

$P_{atm}$ : Presión atmosférica [Psi]

$$P_{abs\ baja} = 43\ Psi + 14,7\ Psi = 57,7\ Psi\ abs$$

$$P_{abs\ alta} = 202\ Psi + 14,7\ Psi = 216,7\ Psi\ abs$$

Para el cálculo de la relación de compresión se utiliza la ecuación 8 de la siguiente manera:

$$r_p = \frac{214,7\ Psi}{59,7\ Psi} = 3,72$$

Este valor de relación de compresión es relativamente bajo comparado con el nominal para el equipo que es de 4,82 según las características del equipo lo que representa que el equipo no está funcionando al máximo de eficiencia, para mejorar esto se debe cargar refrigerante y regular la válvula de expansión para conseguir que el equipo trabaje a presiones nominales lo que produce un cambio total en el comportamiento del equipo lo cual para este ensayo no es recomendable ya que no se tendrá la mismas condiciones de experimentación y la comparación no sería válida.

Para definir completamente el ciclo en el diagrama de Mollier se necesita datos de temperatura a la entrada del compresor y a la entrada a la válvula de expansión con el uso de un termómetro de contacto.

T entrada del compresor:  $-1,1^{\circ}\text{C}$

T salida del compresor:  $49^{\circ}\text{C}$

T entrada de la válvula de expansión:  $22^{\circ}\text{C}$

### 3.1.4 *Calculo del COP*

Se define cada estado con el uso de una tabla de propiedades para el refrigerante 404a y se realiza la extrapolación y comprobación en el diagrama de Mollier de cada estado del ciclo estándar de refrigeración por compresión de vapor.

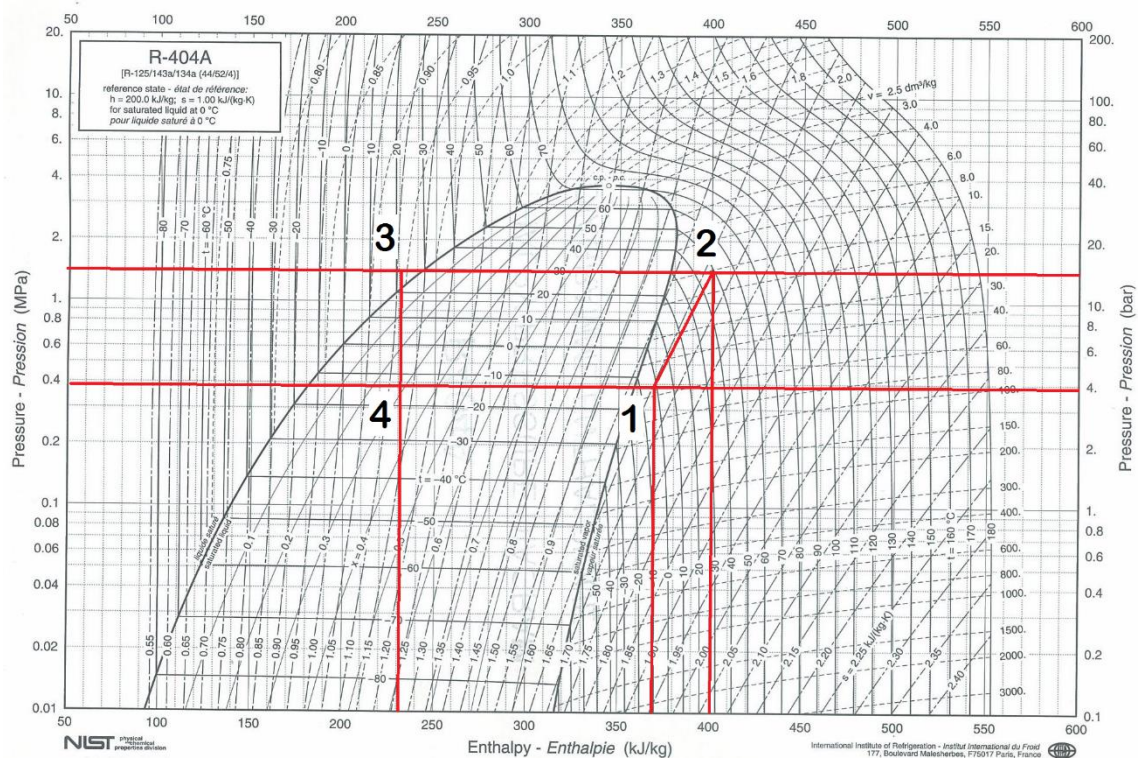
El estado 1 se define completamente con los datos tomados con los instrumentos, al igual que el estado 2 a la salida del compresor, respecto al estado 3 se lo calcula con el dato de temperatura a la entrada de la válvula de expansión y la prolongación de la línea isobárica de alta presión, para definir el estado 4 se lo realiza siguiendo la línea de entalpia constante con el valor obtenido en el estado 3 y la intersección con la línea isobárica de baja presión.

**Tabla 3-3:** Estados del ciclo estándar de refrigeración por compresión

Estado	P[Psia]	P [MPa]	T[ $^{\circ}\text{C}$ ]	h [kJ/kg]
1	57,7	0,397	-1,1	370
2	216,7	1,494	49	401,7
3	216,7	1,494	22	231
4	57,7	0,397	-13	231

Realizado por: Autores





**Gráfico 1-3:** Ciclo estándar de refrigeración por compresión de vapor

Fuente: ([https://fullserviceparana.blogspot.com/2015/01/manual-buenas-practicas-en\\_20.html](https://fullserviceparana.blogspot.com/2015/01/manual-buenas-practicas-en_20.html))

Calculo del COP con la ecuación 19:

$$COP_{Teorico\ de\ Funcionamiento} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{370 - 231}{401,7 - 370} = 4,384$$

Para determinar la eficiencia frigorífica se necesita además calcular el COP máximo del ciclo de Carnot, el mismo que se calcula a condiciones ideales, por lo que se tiene como temperatura caliente 30°C que es la temperatura de condensación y como temperatura fría de -13°C que es la temperatura de evaporación que es la mínima alcanzada por el refrigerante en el ciclo de refrigeración:

$$COP_{Max} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \quad (22)$$

Dónde:

COP<sub>Max</sub>: COP máximo de Carnot [-]

T<sub>C</sub>: Temperatura fría [K]

T<sub>H</sub>: Temperatura caliente [K]

$$COP_{Max} = \frac{260 K}{303 K - 260 K} = 6,046$$

$$\eta_r = \frac{COP_{Fun}}{COP_{Max}} \quad (23)$$

Dónde:

$\eta_r$ : Eficiencia frigorífica [-]

$COP_{Max}$ : COP máximo de Carnot [-]

$COP_{Fun}$ : COP Teórico de funcionamiento [-]

$$\eta_r = \frac{4,384}{6,046} = 72,5\%$$

Este valor de eficiencia frigorífica es el mismo obtenido para el equipo cuando se realizaron las pruebas con cloruro de calcio, por lo que se determina que una leve variación en las presiones de alta y de baja no produce cambios significativos en la eficiencia del equipo, esto debido a la configuración del equipo que trabaja a un grado de recalentamiento constante con un valor de 11,9°C siendo este el resultado del recalentamiento producido en el evaporado y un recalentamiento ambiental producido en los conductos del refrigerante.

### 3.2 Fase de experimentación.

#### 3.2.1 Condiciones de entorno para la experimentación

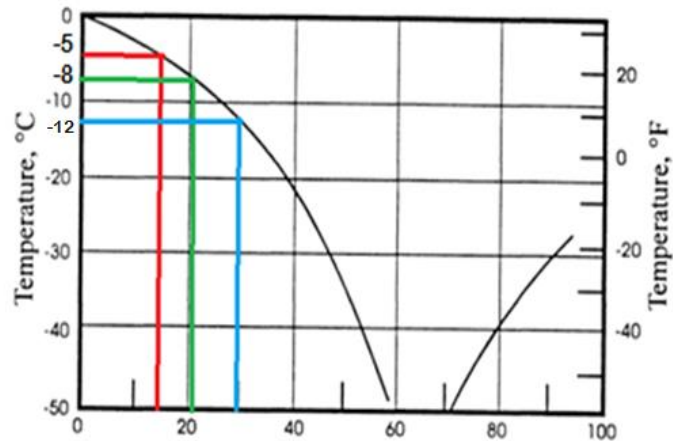
Debido al objetivo de este trabajo se debe procurar realizar la experimentación a condiciones de entorno similares a las que se experimentó con el refrigerante a base de  $CaCl_2$  para poder realizar la comparación entre el refrigerante antiguo y el refrigerante a base de propilenglicol.

Las pruebas con el refrigerante de  $CaCl_2$  se realizaron a temperatura ambiente de entre 19 y 24 grados centígrados y la temperatura de la salmuera en el tanque entre 18 y 22 grados centígrados, además el volumen de refrigerante en el tanque para cada prueba fue de 218l, antes de iniciar cada prueba con el refrigerante a base de propilenglicol se verifico que se cumpla con estos parámetros mencionados.

Cabe recalcar además que en el equipo no se variaron elementos en el equipo chiller, como la potencia de la bomba que es de 1/2HP y la potencia de la unidad condensadora de 3HP

### 3.2.2 Temperatura de congelación de la solución de propilenglicol

Debido a propiedades físicas y químicas del cloruro de calcio se observa en la siguiente grafica que para cada concentración si es posible alcanzar temperaturas menores a los 10°C



**Gráfico 2-3:** Temperatura de congelación de la solución de propilenglicol

Fuente: STOECKER, 1998, p.661

### 3.2.3 Pruebas experimentales con la concentración del 15%

Una vez fijado las condiciones necesarias para realizar las pruebas se requieren la determinación de las cantidades de propilenglicol y de agua para obtener la concentración y volumen requerido.

3.2.3.1 *Determinación de la concentración al 15%.* Para encontrar los respectivos volúmenes de agua y propilenglicol se utiliza la siguiente expresión:

$$C = \frac{V_{pg}}{V_{Sol}} * 100 \quad (24)$$

Dónde:

C: Concentración de la solución por volumen [%]

v<sub>pg</sub>: Volumen de propilenglicol [l]

v<sub>sol</sub>: Volumen de solución [l]

Para cumplir con el requerimiento de poseer 218 litros de volumen de la salmuera se toma este valor como volumen de la solución y como valor de concentración el 15% y con el uso de la ecuación 24 se despeja la cantidad de propilenglicol requerida

$$v_{pg} = \frac{C * v_{Sol}}{100} = \frac{15 * 218 l}{100} = 32,7 l$$

$$v_{Sol} = v_{pg} + v_a \quad (25)$$

Dónde:

$v_{Sol}$ : Volumen de solución [l]

$v_{pg}$ : Volumen de propilenglicol [l]

$v_a$ : Volumen de agua [l]

$$v_a = v_{Sol} - v_{pg} = 218 l - 32,7 l = 185,3 l$$

3.2.3.2 *Verificación de la concentración al 15% por el método del picnómetro.* Para realizar esta comprobación se debe antes medir la densidad y la temperatura de la solución para determinar la concentración de la solución usando un monograma de densidades de la solución a distintas concentraciones y temperaturas

Para el cálculo de la densidad se utiliza un picnómetro el mismo que se muestra en la figura, por lo que se inicia este proceso midiendo la masa del picnómetro sin la solución de propilenglicol en una báscula, luego se mide la masa de la solución en el picnómetro con la finalidad de encontrar la masa de la solución.



**Figura 5-3:** Medición de la masa del picnómetro

Realizado por: Autores

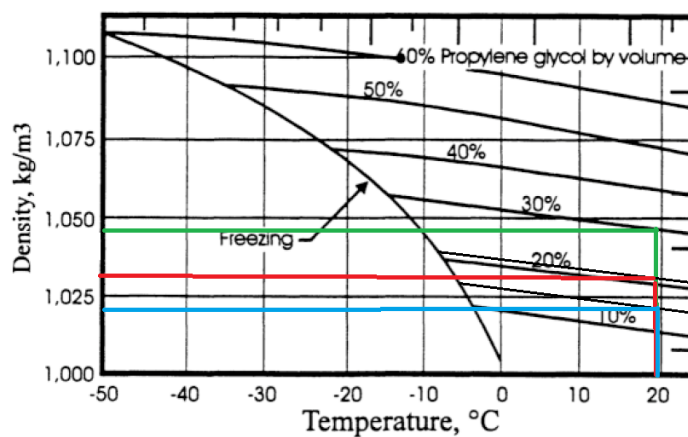
Luego de las mediciones se obtuvo la siguiente tabla en el cual se muestra los resultados los mismos que permiten obtener la densidad de la solución a cierta temperatura.

**Tabla 4-3:** Datos de la solución de propilenglicol al 15%

	Valor	Unidad
Temperatura de la solución de propilenglicol	19,12	°C
Masa picnómetro	15,3231	g
Masa picnómetro + Masa de solución de propilenglicol	25,5352	g
Masa propilenglicol	10,2121	g
Volumen de picnómetro	10	ml
Densidad de solución propilenglicol	1,02121	g/ml
Densidad de solución propilenglicol	1021,21	kg/m <sup>3</sup>

Realizado por: Autores

Al dibujar rectas paralelas a los ejes de temperatura y de densidad en el gráfico mostrado a continuación se puede encontrar la concentración de la solución en la cual efectivamente se encontró que la solución de propilenglicol se encuentra al 15%,



**Gráfico 3-3:** Densidad de la solución de propilenglicol

Fuente: STOECKER, 1998, p.662

3.2.2.3 Prueba N°1 Datos de la experimentación:

Fecha: 2017/07/10

Hora: 10:00

Concentración: 15%

Apertura de válvula: 100%

Temperatura ambiente: 20,91°C

Temperatura de la salmuera: 19,41°C

**Tabla 5-3:** Datos de prueba N°1

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,412343
5	28,886549	17,523574
10	28,886514	15,760137
15	28,890323	13,987532
20	28,886304	12,277625
25	28,886219	10,632157
30	28,891220	9,214953
35	28,879951	7,813204
40	28,851669	6,527249
45	28,861679	5,313752
50	28,811235	4,123454
55	28,791675	3,103914
60	28,786959	2,091485
65	28,736819	1,123567
70	28,696195	0,153479
75	28,641969	-0,817980
80	28,612964	-1,694023
85	28,551786	-2,423433
90	28,489985	-3,010250
95	27,309457	-3,513023
100	24,103423	-3,998825
105	22,945490	-4,302010
110	21,050856	-4,313295
115	17,549564	-4,184455
120	15,436783	-4,201454

Realizado por: Autores

A partir del minuto 105 la temperatura tiende a estabilizarse en  $-4^{\circ}\text{C}$ , a partir de este punto se produce un enfriamiento excesivamente lento que a nivel industrial no tendría aplicación, además inicia la aparición de escarcha en las superficies del evaporador y en la tubería que va desde el evaporador hasta el compresor.



**Figura 6-3:** Aparición de escarcha en tubería que va al compresor

Realizado por: Autores

Desde el inicio de la prueba el refrigerante se enfría contantemente hasta llegar a su temperatura tomando en cuenta el tiempo total de la prueba es posible calcular una velocidad de enfriamiento promedio para cada prueba representando esto en la siguiente ecuación:

$$V_{enf} = \frac{|T_f - T_o|}{t} \quad (26)$$

Dónde:

$V_{enf}$ : Velocidad de enfriamiento [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]

$T_o$ : Temperatura inicial de la sustancia en el periodo de evaluación [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_f$ : Temperatura final que alcanza la sustancia en el periodo de evaluación [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t$ : Periodo de tiempo que dura la evaluación [ $\text{min}$ ]

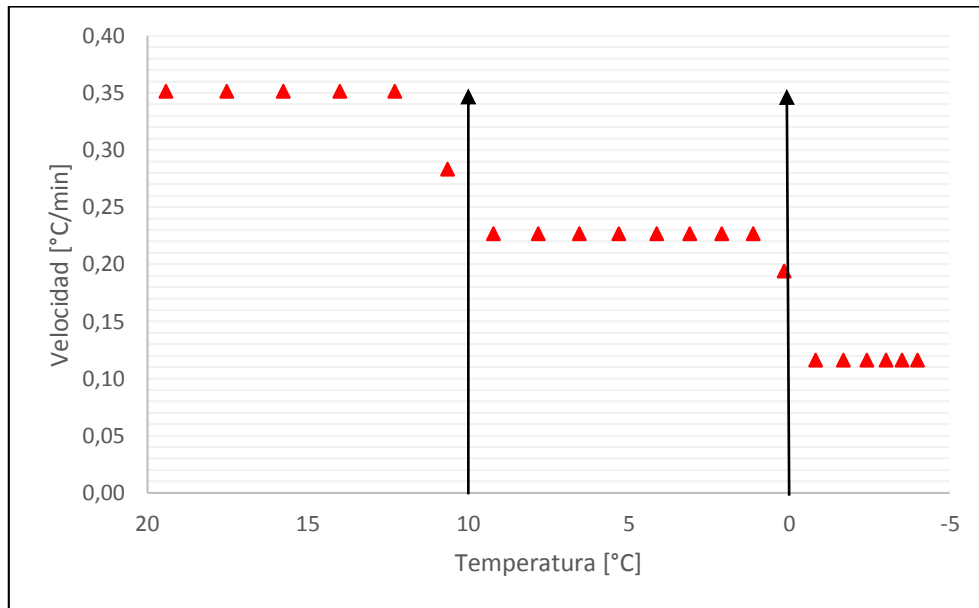
Considerando como temperatura mínima de la salmuera  $4,30^{\circ}\text{C}$  para esta concentración, se procede a calcular la velocidad de enfriamiento promedio, ya que durante la prueba la velocidad no se mantiene constante

$$V_{enf} = \frac{|-4,30 - 19,41|}{105} = 0,2258 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

Por razones de apreciación del comportamiento del fluido se procedió a dividir a este proceso de refrigeración en tres zonas de la siguiente manera:

- Zona de refrigeración de alta temperatura desde la temperatura ambiente hasta  $10^{\circ}\text{C}$ .
- Zona intermedia comprendida entre los  $10^{\circ}\text{C}$  y  $0^{\circ}\text{C}$
- Zona de baja temperatura correspondiente a temperaturas menores a  $0^{\circ}\text{C}$ .

Mediantes la aplicación de la ecuación 26 se calculó la velocidad de enfriamiento para cada zona lo cual permitió obtener el siguiente diagrama en el cual se observa la variación en la velocidad de enfriamiento durante el desarrollo de la prueba experimental.



**Gráfico 4-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N° 1

Realizado por: Autores

#### 3.2.2.4 Prueba N°2 Datos de la experimentación:

Fecha: 2017/07/12

Hora: 10:15

Concentración: 15%

Apertura de válvula: 75 %

Temperatura ambiente: 22,11°C

Temperatura de la salmuera: 19,22°C

**Tabla 6-3:** Datos de prueba N°2

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,223588
5	28,017245	17,522019
10	28,017245	15,834500
15	28,017123	14,149954
20	28,016910	12,631980



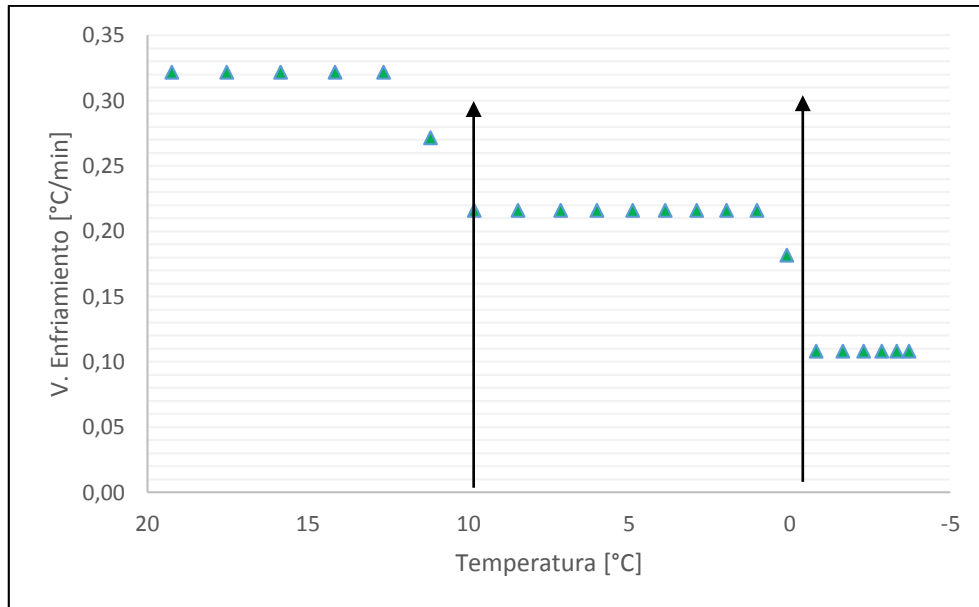
**Tabla 6-3:** (continuación) Datos de prueba N°2

25	28,016801	11,172195
30	28,016782	9,813430
35	28,016140	8,459649
40	28,015083	7,131323
45	28,014871	5,997124
50	28,014323	4,875373
55	28,012214	3,864534
60	28,010282	2,890187
65	27,999896	1,961063
70	27,987609	1,012137
75	27,979432	0,081124
80	27,961155	-0,828951
85	27,950144	-1,657611
90	27,948656	-2,301180
95	27,890245	-2,877633
100	27,692358	-3,345986
105	27,568689	-3,713546
110	27,287657	-4,078900

Fuente: Autores

Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-4,07 - 19,22|}{110} = 0,2112 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 5-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°2

Realizado por: Autores

3.2.2.5 Prueba N°3 Datos de la experimentación:

Fecha: 2017/07/14

Hora: 11:00

Concentración: 25%

Apertura de válvula: 50%

Temperatura ambiente: 20,41°C

Temperatura inicial de la salmuera: 19,13°C

**Tabla 7-3:** Datos de prueba N°3

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,132972
5	25,997532	17,678703
10	25,997501	16,230358
15	25,997421	14,745356
20	25,997309	13,276852
25	25,997256	11,892721
30	25,997211	10,542157
35	25,997201	9,234349
40	25,997153	8,019204
45	25,996241	6,945124
50	25,996016	5,869529

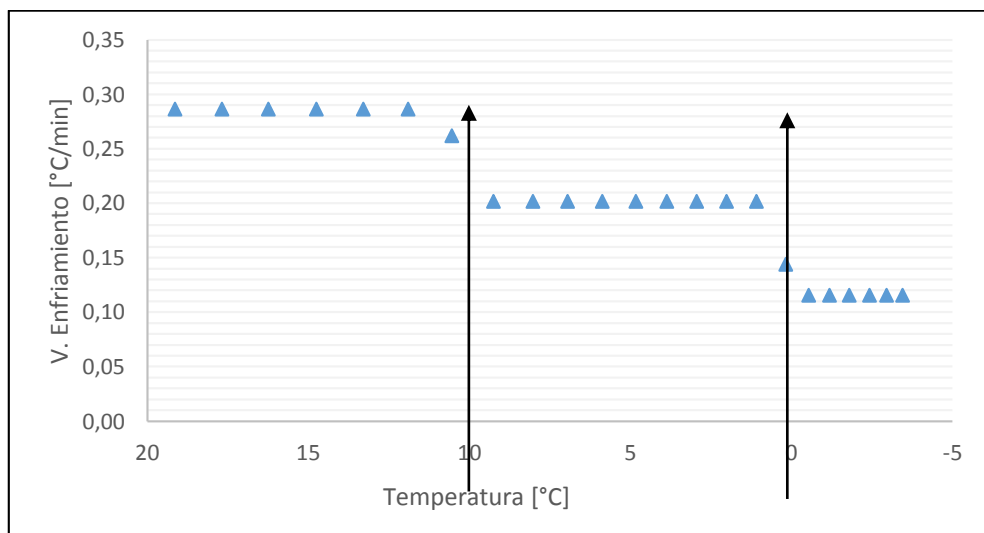
**Tabla 7-3:** (continuación) Datos de prueba N°3

55	25,995133	4,819345
60	25,994722	3,862556
65	25,993975	2,935736
70	25,993103	1,998072
75	25,992123	1,069120
80	25,991033	0,169852
85	25,986432	-0,547456
90	25,982435	-1,199877
95	25,980134	-1,800763
100	25,972441	-2,432134
105	25,969347	-2,958749
110	25,953214	-3,469445
115	25,942145	-4,003213

Realizado por: Autores

Las pruebas experimentales para concentración de 15% se realizaron solo hasta llegar a la temperatura de  $-4^{\circ}\text{C}$ , debido a que a partir de esta temperatura se presenta una disminución de caudal muy notable, por lo que se detienen las pruebas con la finalidad de no forzar al equipo  
Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-4,00 - 19,13|}{115} = 0,2011 \text{ } ^{\circ}\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 6-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°3

Realizado por: Autores

3.2.2.6 Prueba N°4 Datos de la experimentación:

Fecha: 2017/07/17

Hora: 14:00

Concentración: 15%

Apertura de válvula: 25%

Temperatura ambiente: 21,01°C

Temperatura de la salmuera: 18,99°C

**Tabla 8-3:** Datos de prueba N°4

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	18,997594
5	16,986473	17,775169
10	16,986313	16,535148
15	16,986301	15,200213
20	16,985985	13,877969
25	16,985212	12,554866
30	16,984983	11,329355
35	16,984821	10,159872
40	16,984821	8,987862
45	16,984524	7,864354
50	16,984241	6,794221
55	16,984101	5,849169
60	16,984993	4,918489
65	16,984213	4,121019
70	16,983956	3,399419
75	16,983655	2,687644
80	16,983245	2,103990
85	16,982356	1,491234
90	16,982178	0,940649
95	16,982018	0,378955
100	16,991421	-0,161999
105	16,990124	-0,673546
110	16,904479	-1,176312
115	16,716324	-1,679737
120	16,444555	-2,205941
125	15,895625	-2,712899

**Tabla 8-3:** (continuación) Datos de prueba N°4

130	15,674538	-3,125546
135	15,178524	-3,549245
140	15,013245	-4,002257

Realizado por: Autores

En el desarrollo de esta prueba es notable el decremento del caudal reflejándose esto en la aparición de congelamiento casi total del evaporador del equipo chiller.

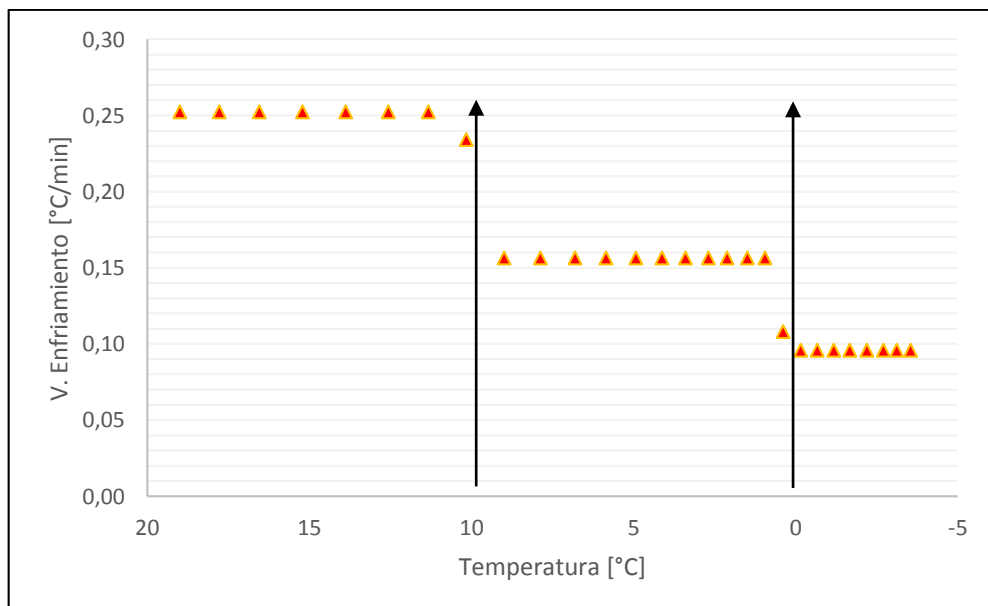


**Figura 7-3:** Congelamiento en el evaporador

Realizado por: Autores

Velocidad de enfriamiento:

$$V_{enf} = \frac{|-4,00 - 18,99|}{140} = 0,164 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$

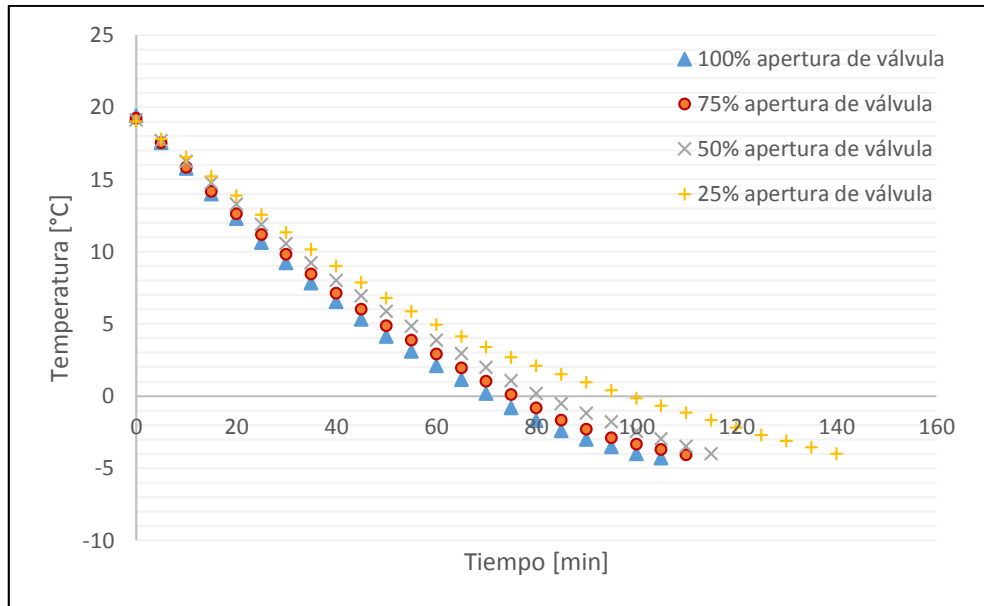


**Gráfico 7-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°4

Realizado por: Autores

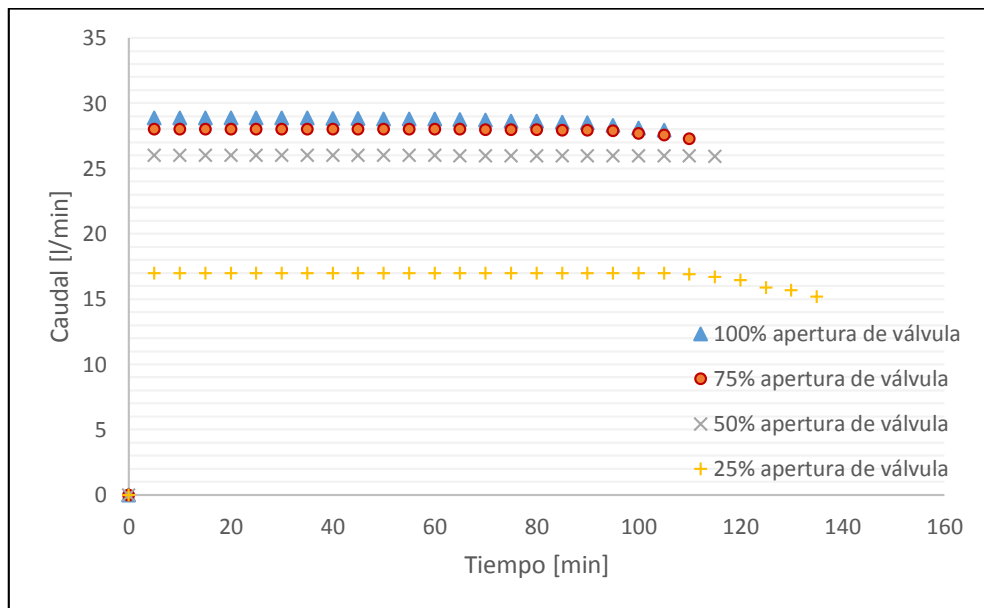
### 3.2.4 Curvas de enfriamiento para la solución de propilenglicol al 15%

Luego de la obtención de datos se procedió a obtener las curvas características de enfriamiento en el que se observa la influencia que tiene la variación de caudal en la transferencia de calor.



**Gráfico 8-3:** Curvas de enfriamiento temperatura vs tiempo para solución al 15%

Realizado por: Autores



**Gráfico 9-3:** Curvas de enfriamiento caudal vs tiempo para solución al 15%

Realizado por: Autores

A medida que se disminuye el caudal de recirculación al variar la apertura de la válvula se produce una menor transferencia de calor eso se refleja en que se necesita de mayor tiempo para llegar a la misma temperatura.

### 3.2.5 Pruebas experimentales con la concentración del 21%

Antes de iniciar las pruebas al 21% de concentración se debe realizar la determinación de la cantidad adicional de propilenglicol a adicionar y la cantidad de solución a retirar para conservar el volumen requerido para la prueba.

3.2.5.1 *Determinación de la solución al 21%.de concentración.* Para conseguir la concentración de 21% a partir de la solución de 15% se debe añadir una porción adicional de propilenglicol conservando la misma cantidad de agua, lo que se representa en la siguiente ecuación:

$$C_f = \frac{V_{pg\ o} + V_{pg\ ad}}{V_{Sol} + V_{pg\ ad}} * 100 \quad (27)$$

Dónde:

$C_f$ : Concentración final o esperada de la solución por volumen [%]

$v_{pg\ o}$ : Volumen de propilenglicol inicial en la solución [l]

$v_{pg\ ad}$ : Volumen de propilenglicol adicional para obtener la concentración requerida [l]

$v_{Sol}$ : Volumen de la solución [l]

Considerando un volumen de 32,7 litros de propilenglicol en la solución al 15% se procede al calcula de la cantidad de propilenglicol adicional se despeja este valor de la ecuación: 26

$$V_{pg\ ad} = \frac{C_f \cdot V_{Sol} - 100\% \cdot V_{pg\ o}}{100 - C_f}$$

$$V_{pg\ ad} = \frac{21\% \cdot 218\ l - 100\% \cdot 32,7\ l}{100\% - 21\%} = 16,56\ l$$

Se debe añadir 16,56 litros de propilenglicol para obtener una concentración de 21% que luego que se obtenga una mezcla homogénea de la solución se debe retirar la misma cantidad de solución para seguir manteniendo el mismo volumen de solución requerido para la prueba.

Debido a la disminución de la cantidad de solución se debe recalcular la cantidad real de propilenglicol para la concentración de 21% y el volumen de 218 litros, lo que se puede realizar con la ecuación 24:

$$v_{pg} = \frac{C * v_{Sol}}{100} = \frac{21 \% * 218 l}{100 \%} = 45,78 l$$

De esta manera es posible adicionalmente encontrar el volumen de agua real presente en la solución a partir de la ecuación 24:

$$v_a = v_{Sol} - v_{pg} = 218 l - 45,78 l = 172,22 l$$

3.2.5.2 *Verificación de la concentración del 21% por el método del picnómetro.* De manera similar al caso anterior se procede a tomar datos de las masas y temperaturas para calcular la densidad de la solución.

**Tabla 9-3:** Datos para la determinación de la densidad de la solución al 21%

	Valor	Unidad
Temperatura de la solución de propilenglicol	19,02	°C
Masa picnómetro	15,3231	g
Masa picnómetro + Masa de solución de propilenglicol	25,6211	g
Masa propilenglicol	10,2980	g
Volumen de picnómetro	10	ml
Densidad de solución propilenglicol	1,0298	g/ml
Densidad de solución propilenglicol	1029,8	kg/m <sup>3</sup>

Realizado por: Autores

Como se observa en el grafico 7-3 la solución de propilenglicol tiene un densidad de alrededor de 1,029 g/ml y se comprueba con el cálculo de los datos obtenidos del picnómetro.

3.2.4.3 *Prueba N°5* Datos de la experimentación:

Fecha: 2017/07/19

Hora: 14:05

Concentración: 21%

Apertura de válvula: 100%

Temperatura ambiente: 21,01°C

Temperatura de la salmuera: 19,29°C



**Tabla 10-3:** Datos de prueba N°5

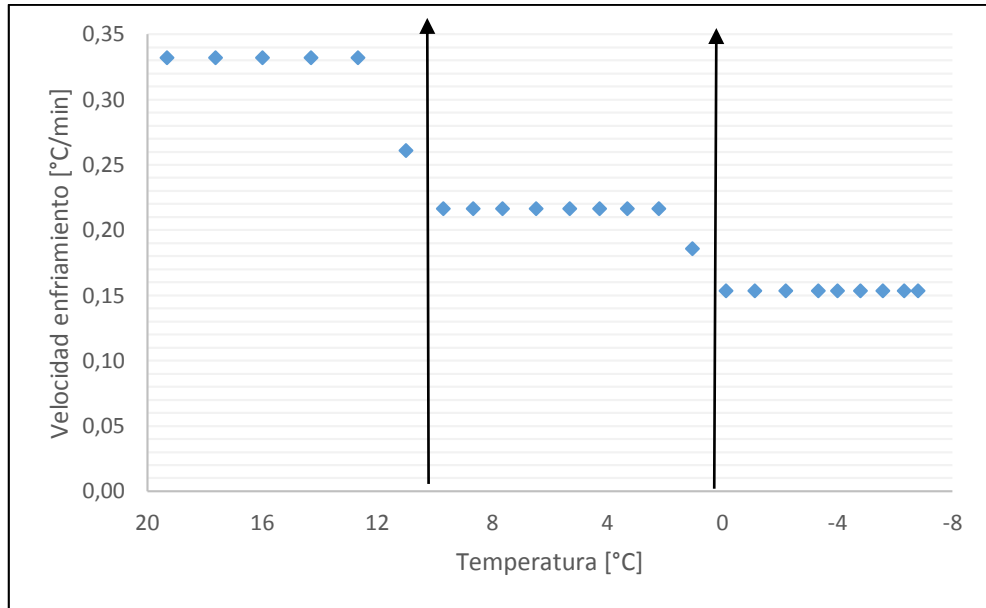
Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,299754
5	28,181969	17,615820
10	28,181912	15,975294
15	28,181872	14,297451
20	28,181824	12,865495
25	28,181812	11,299632
30	28,181801	9,869170
35	28,181798	8,762527
40	28,182785	7,365738
45	28,181880	6,473963
50	28,181771	5,294569
55	28,185768	4,254854
60	28,181061	3,296315
65	28,181058	2,202456
70	28,181151	1,037587
75	28,181748	-0,129134
80	28,181649	-1,135694
85	28,181736	-2,214234
90	28,181229	-3,129350
95	28,181750	-4,014300
100	28,181715	-4,808999
105	28,181643	-5,594348
110	28,183223	-6,341303
115	28,181593	-6,820732
120	28,163694	-7,219329
125	27,06786	-7,183258
130	25,467676	-7,194657

Realizado por: Autores

Hasta la temperatura de  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  es notable el enfriamiento de la solución, luego de este punto se observa una disminución repentina del caudal por lo que se detiene la prueba con el propósito de evitar daños en el equipo

Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-7,21 - 19,29|}{120} = 0,2208 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 10-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°5

Realizado por: Autores

3.2.4.4 Prueba N°6 Datos de la experimentación:

Fecha: 2017/07/21

Hora: 14:00

Concentración: 21%

Apertura de válvula: 75%

Temperatura ambiente: 21,01°C

Temperatura de la salmuera: 18,95°C

**Tabla 11-3:** Datos de prueba N°6

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	18,958965
5	27,191382	17,306413
10	27,181280	16,127550
15	27,191378	14,474810
20	27,191671	13,040414
25	27,197370	11,475430
30	27,191369	10,099869
35	27,191067	8,996527

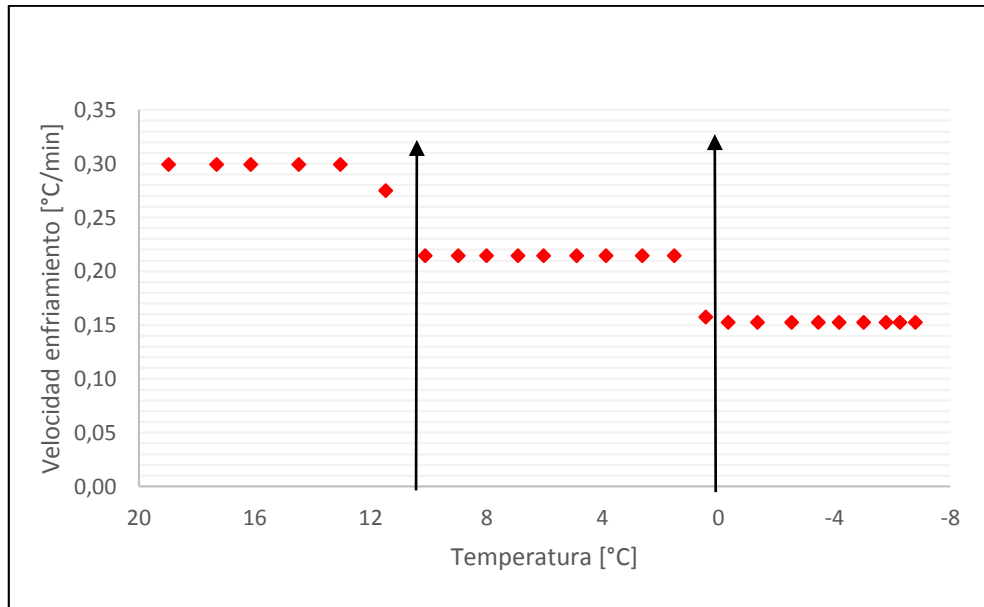
**Tabla 11-3:** (continuación) Datos de prueba N°6

40	27,191453	7,696376
45	27,191360	6,689747
50	27,197656	5,679029
55	27,191351	4,542873
60	27,193350	3,568730
65	27,191749	2,620246
70	27,190341	1,503759
75	27,192234	0,432191
80	27,191330	-0,584240
85	27,192321	-1,543592
90	27,181311	-2,541604
95	27,191309	-3,460143
100	27,190301	-4,172809
105	27,191201	-5,025943
110	27,193198	-5,803413
115	27,180934	-6,282073
120	27,190022	-6,803293
125	26,856766	-7,228657

Realizado por: Autores

Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-7,22 - 18,95|}{125} = 0,2093 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 11-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°6

Realizado por: Autores

3.2.4.5 Prueba N°7 Datos de la experimentación:

Fecha: 2017/07/24

Hora: 14:00

Concentración: 21%

Apertura de válvula: 50%

Temperatura ambiente: 21,01°C

Temperatura de la salmuera: 19,05°C

**Tabla 12-3:** Datos de prueba N°7

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,058965
5	24,891381	17,476831
10	24,891365	16,012755
15	24,891343	14,647481
20	24,891312	13,450404
25	24,891284	11,984754
30	24,891251	10,731963
35	24,891213	9,435220
40	24,891201	8,314400
45	24,891193	7,362537
50	24,891142	6,364295
55	24,891101	5,372549

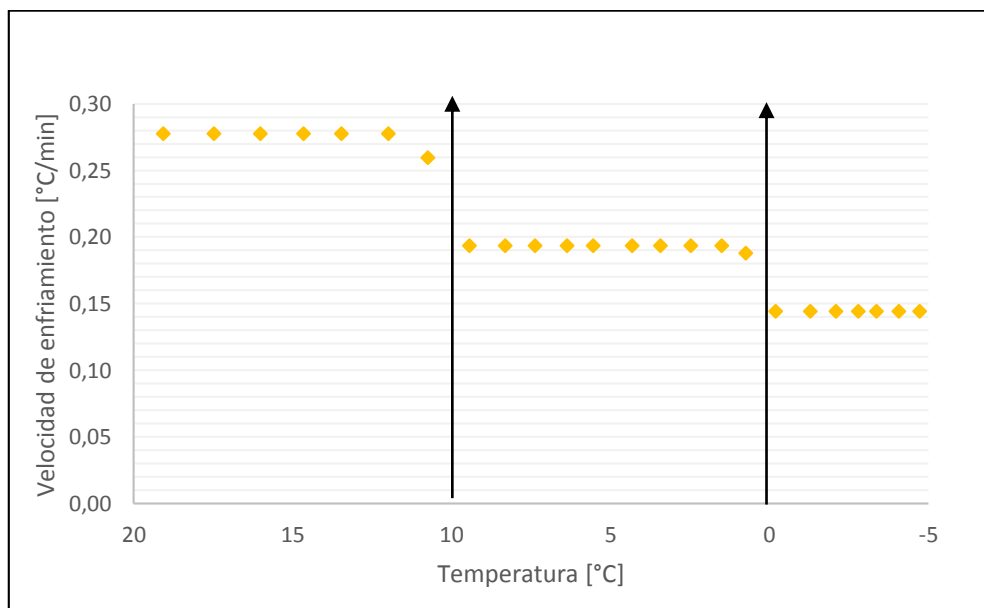
**Tabla 12-3:** (continuación) Datos de prueba N°7

60	24,891013	4,319296
65	24,890137	3,421862
70	24,890024	2,468504
75	24,887834	1,593208
80	24,882720	0,573212
85	24,874634	-0,380710
90	24,869385	-1,287542
95	24,861294	-2,106985
100	24,860012	-2,980470
105	24,858362	-3,654372
110	24,852333	-4,431080
115	24,849954	-4,987383
120	24,810384	-5,653603
125	24,724695	-6,193803
130	24,127494	-6,698901

Realizado por: Autores

Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-6,69 - 19,05|}{130} = 0,198 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 12-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°7

Realizado por: Autores

3.2.4.6 Prueba N°8 Datos de la experimentación:

Fecha: 2017/07/26

Hora: 14:00

Concentración: 21%

Apertura de válvula: 25%

Temperatura ambiente: 21,54°C

Temperatura de la salmuera: 19,35°C

**Tabla 13-3:** Datos de prueba N°8

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,350590
5	15,486758	17,789477
10	15,486734	16,384080
15	15,486712	14,977688
20	15,486645	13,674504
25	15,486623	12,398475
30	15,486601	11,199732
35	15,486583	9,874352
40	15,486523	8,715988
45	15,486503	7,783625
50	15,486445	6,783643
55	15,486401	5,965537
60	15,486398	5,003193
65	15,486285	3,994219
70	15,486201	3,075475
75	15,486185	2,197693
80	15,486103	1,399007
85	15,485554	0,645710
90	15,485129	-0,128754
95	15,484880	-0,781611
100	15,484143	-1,346982
105	15,483820	-2,023717
110	15,482288	-2,579099
115	15,481975	-3,140383
120	15,481034	-3,890274
125	15,479834	-4,503803

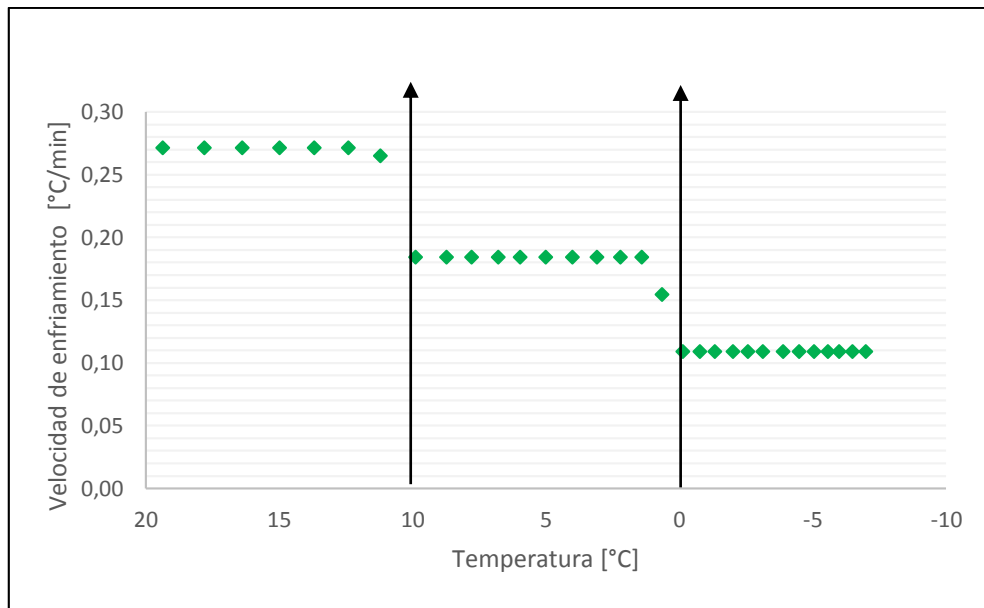
**Tabla 13-3:** (continuación) Datos de prueba N°8

130	15,472955	-5,056989
135	15,470140	-5,567999
140	15,460986	-6,004373
145	15,458330	-6,489960
150	15,023455	-7,002146
155	14,237566	-7,224686

Realizado por: Autores

Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-7,22 - 19,35|}{155} = 0,1714 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$

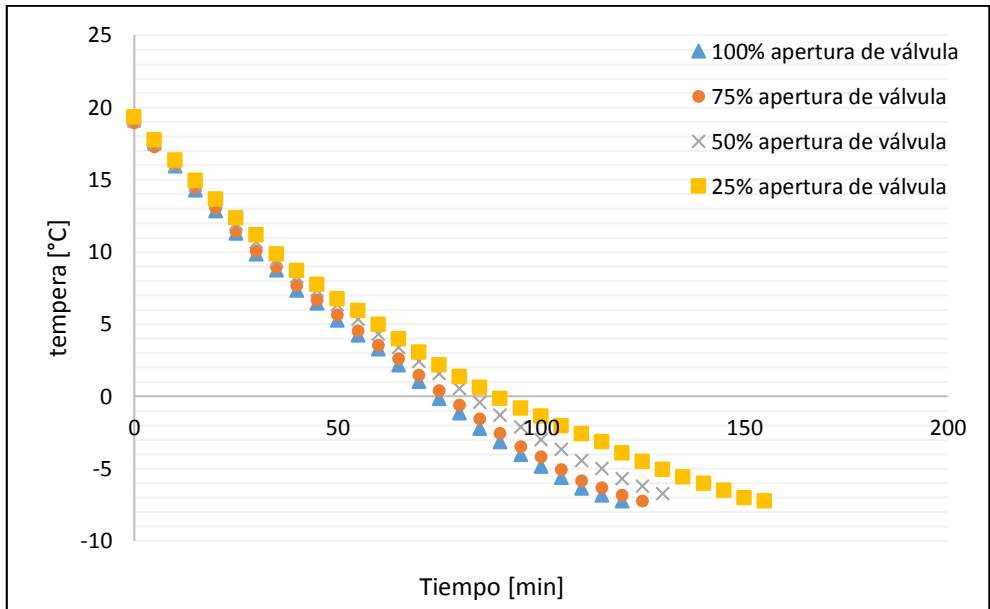


**Gráfico 7-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°8

Realizado por: Autores

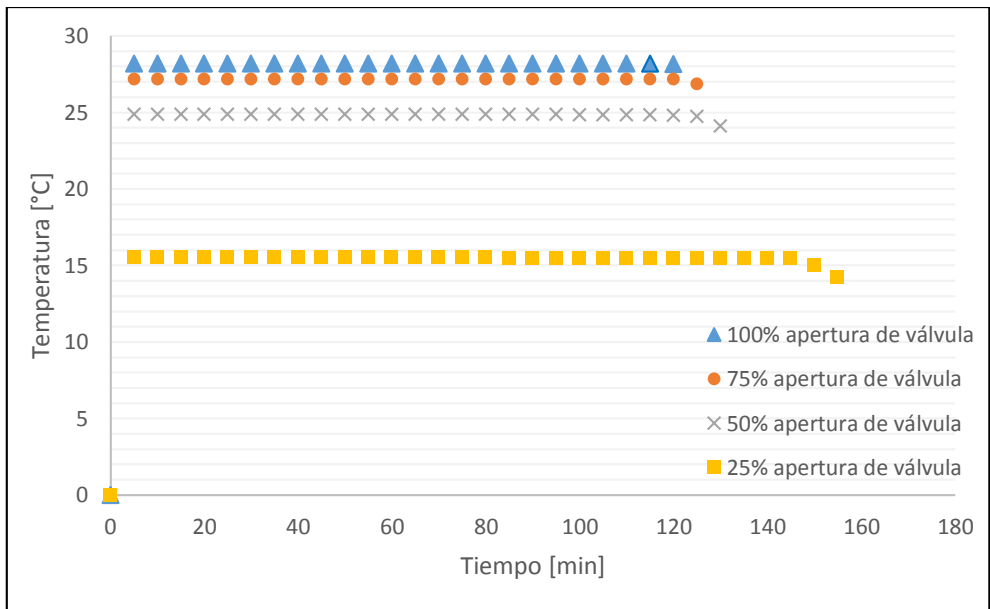
### 3.2.6 Curvas de enfriamiento para la solución de propilenglicol al 21%

Curvas características de enfriamiento en el que se observa la influencia que tiene la variación de caudal en la transferencia de calor.



**Gráfico 8-3:** Curvas de enfriamiento temperatura vs tiempo para solución al 21%

Realizado por: Autores



**Gráfico 9-3:** Curvas de enfriamiento caudal vs tiempo para solución al 21%

Realizado por: Autores

Respecto al comportamiento de la temperatura del caudal se nota que en la zona de enfriamiento rápido no existe mayor cambio en la transferencia de calor a diferencia que en la zona de enfriamiento lento en el cual se produce gran diferencia de la temperatura.



### 3.2.7 Pruebas experimentales con la concentración al 30%

Antes de iniciar las pruebas al 30% de concentración se debe realizar la determinación de la cantidad adicional de propilenglicol a adicionar y la cantidad de solución a retirar para conservar el volumen requerido para la prueba.

3.2.7.1 *Determinación de la solución al 30% de concentración.* De manera similar al caso anterior se puede encontrar el volumen de propilenglicol que se debe añadir a la solución actual con la finalidad de pasar la concentración del 21% al 30%, tomando en cuenta la misma cantidad de agua de la solución al 21% tomando como base la ecuación 26:

$$V_{pg\ ad} = \frac{C_f \cdot V_{Sol} - 100\% \cdot V_{pg\ o}}{100\% - C_f}$$
$$V_{pg\ ad} = \frac{30\% \cdot 218\ l - 100\% \cdot 45,78\ l}{100\% - 30\%} = 28,02\ l$$

Se debe añadir 28,02 litros de propilenglicol para obtener una concentración de 30% que luego que se obtenga una mezcla homogénea de la solución se debe retirar esta misma cantidad de solución para seguir manteniendo el mismo volumen de solución.

Las cantidades finales de propilenglicol y de agua en el volumen de 218 litros se calculan a partir de la ecuación 25.

$$v_{pg} = \frac{C \cdot v_{Sol}}{100} = \frac{30\% \cdot 218\ l}{100\%} = 65,4\ l$$

$$v_a = v_{Sol} - v_{pg} = 218\ l - 65,4\ l = 152,6\ l$$

#### 3.2.6.2 Prueba N°9 Datos de la experimentación.

Fecha: 2017/07/28

Hora: 14:00

Concentración: 30%

Apertura de válvula: 100%

Temperatura ambiente: 21,01°C

Temperatura de la salmuera: 19,46°C

**Tabla 14-3:** Datos de prueba N°9

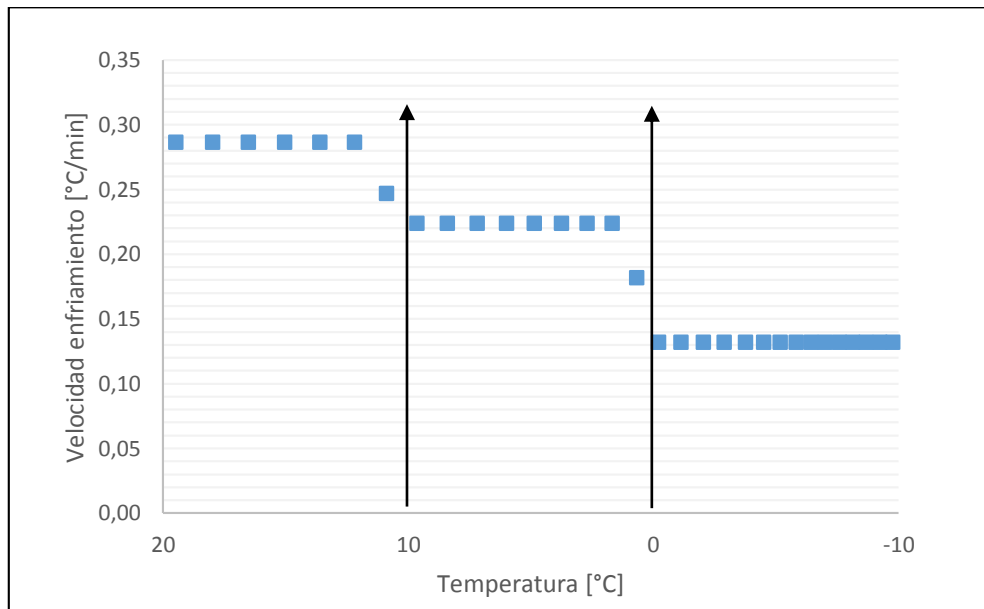
Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,460537
5	27,018196	17,969713
10	27,018102	16,497894
15	27,017984	15,035250
20	27,017523	13,592579
25	27,017023	12,166747
30	27,016984	10,868558
35	27,016503	9,633081
40	27,016013	8,397414
45	27,015834	7,159756
50	27,015145	5,973995
55	27,014834	4,830612
60	27,014431	3,725952
65	27,013984	2,690937
70	27,013023	1,665416
75	27,012865	0,671625
80	27,012013	-0,236857
85	27,011742	-1,141536
90	27,010743	-2,054633
95	27,003464	-2,915769
100	27,000600	-3,773860
105	26,919955	-4,515462
110	26,919044	-5,183586
115	26,818326	-5,839987
120	26,801244	-6,458849
125	26,790102	-7,009021
130	26,735802	-7,601057
135	26,701242	-8,155654
140	26,698620	-8,705434
145	26,601840	-9,250668
150	26,598020	-9,792408
155	26,498727	-10,135298

Realizado por: Autores

Para la concentración de 30% la solución si alcanza la temperatura de 10°C, pero es notoria la deficiencia de las características de la bomba ya que si es notable una disminución del caudal a diferencia de las pruebas anteriores en el cual se puede considerar casi como un caudal constante.

Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-10,13 - 19,46|}{155} = 0,1909 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 10-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°9

Realizado por: Autores

### 3.2.6.3 Prueba N°10 Datos de la experimentación.

Fecha: 2017/07/31

Hora: 14:15

Concentración: 30%

Apertura de válvula: 75%

Temperatura ambiente: 21,01°C

Temperatura de la salmuera: 19,47°C

**Tabla 15-3:** Datos de prueba N°10

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,477061
5	26,030532	18,012047
10	26,030426	16,566038

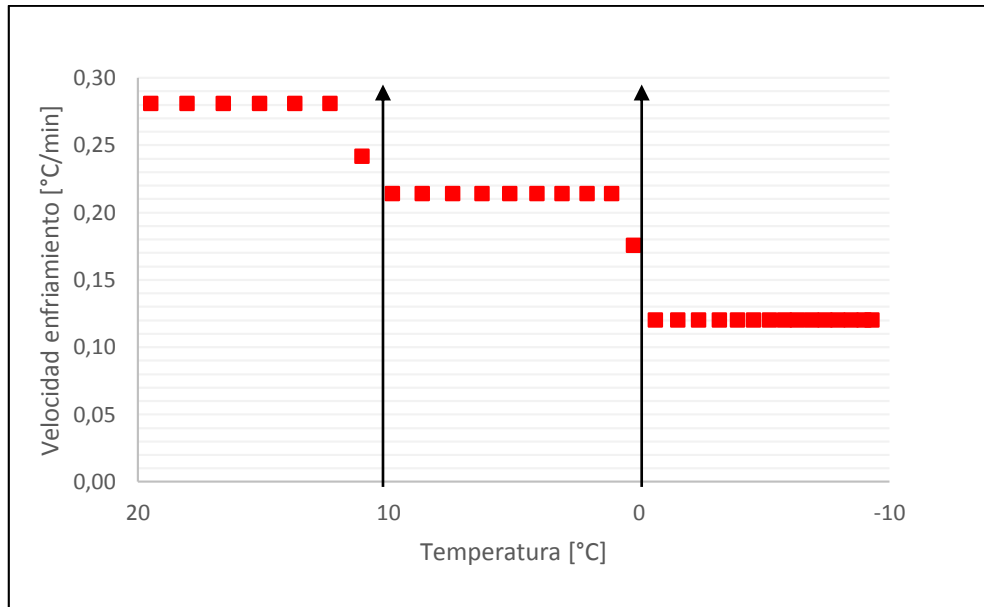
**Tabla 15-3:** (continuación) Datos de prueba N°10

15	26,030296	15,129206
20	26,029823	13,712345
25	26,029311	12,312323
30	26,029260	11,039945
35	26,028767	9,830278
40	26,028265	8,620422
45	26,028074	7,408574
50	26,027373	6,248623
55	26,027050	5,131052
60	26,026635	4,052202
65	26,026176	3,042997
70	26,025203	2,043287
75	26,025033	1,075307
80	26,024169	0,192635
85	26,023886	-0,686234
90	26,022875	-1,573520
95	26,015584	-2,408846
100	26,012708	-3,241126
105	25,932051	-3,956917
110	25,931128	-4,599232
115	25,830398	-5,229822
120	25,813304	-5,822874
125	25,802151	-6,347235
130	25,747838	-6,913461
135	25,713266	-7,442247
140	25,710632	-7,966216
145	25,613840	-8,485640
150	25,610008	-9,001569
155	25,510703	-9,318649
160	25,413960	-9,704375

Realizado por: Autores

Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-9,70 - 19,47|}{160} = 0,1823 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 11-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°10

Realizado por: Autores

3.2.6.4 Prueba N°11 Datos de la experimentación.

Fecha: 2017/08/02

Hora: 14:00

Concentración: 30%

Apertura de válvula: 50%

Temperatura ambiente: 21,01°C

Temperatura de la salmuera: 19,49°C

**Tabla 16-3:** Datos de prueba N°11

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,493585
5	22,842869	18,046829
10	22,842751	16,619079
15	22,842609	15,200504
20	22,842124	13,801902
25	22,841600	12,420138
30	22,841537	11,166017
35	22,841032	9,974609
40	22,840518	8,783011
45	22,840315	7,589421
50	22,839602	6,447728

**Tabla 16-3:** (continuación) Datos de prueba N°11

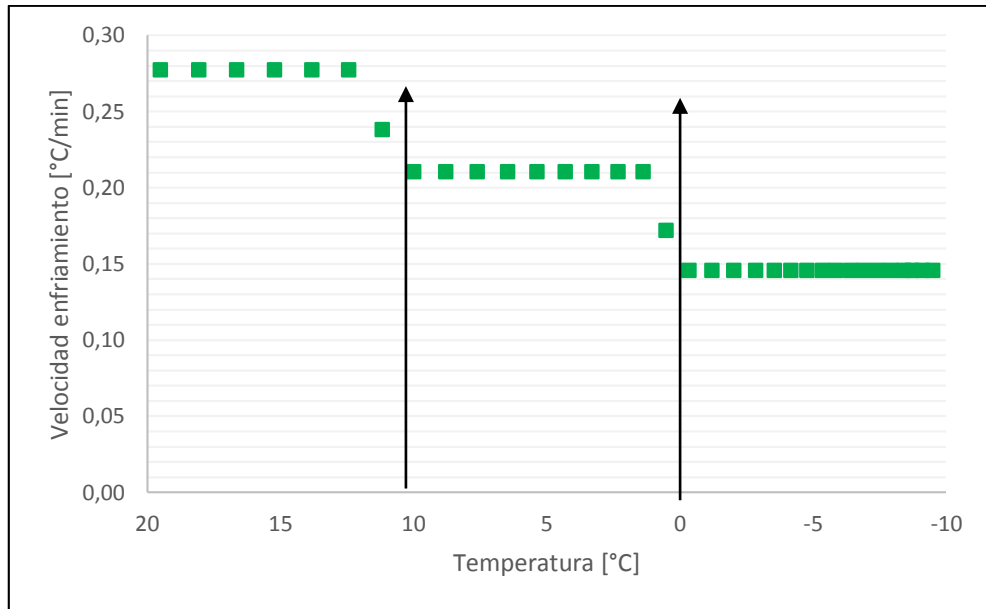
55	22,839267	5,348415
60	22,838840	4,287823
65	22,838369	3,296876
70	22,837384	2,315424
75	22,837202	1,365702
80	22,836326	0,501289
85	22,836031	-0,359322
90	22,835008	-1,228350
95	22,827705	-2,045418
100	22,824817	-2,859440
105	22,744148	-3,556973
110	22,743212	-4,181029
115	22,642471	-4,793361
120	22,625365	-5,368155
125	22,614199	-5,874259
130	22,559875	-6,422226
135	22,525291	-6,932754
140	22,522644	-7,438465
145	22,425841	-7,939631
150	22,421996	-8,437302
155	22,322680	-8,736124
160	22,225924	-9,103591
165	22,103984	-9,516499
170	21,991363	-9,832456

Realizado por: Autores

Para estas condiciones de funcionamiento al igual que en el caso anterior se produce un recalentamiento del condensador lo que hace notar el alto consumo de corriente por la bomba debido al mayor requerimiento de potencia para realizar el bombeo del refrigerante secundario.

Velocidad de enfriamiento promedio:

$$V_{enf} = \frac{|-9,83 - 19,49|}{170} = 0,1724 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 12-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°11

Realizado por: Autores

3.2.6.5 Prueba N°12 Datos de la experimentación.

Fecha: 2017/08/04

Hora: 14:00

Concentración: 30%

Apertura de válvula: 25%

Temperatura ambiente: 21,01°C

Temperatura de la salmuera: 19,47°C

**Tabla 2-3:** Datos de prueba N°12

Tiempo [min]	Caudal [l/min]	Temperatura [°C]
0	0,000000	19,469932
5	13,170857	18,162609
10	13,170727	16,826986
15	13,170573	15,500539
20	13,170076	14,194065
25	13,169540	12,904428
30	13,169465	11,742435
35	13,168948	10,643155
40	13,168422	9,543684
45	13,168207	8,442222
50	13,167482	7,392657

**Tabla 3-3:** (continuación) Datos de prueba N°12

55	13,167135	6,385471
60	13,166696	5,417007
65	13,166213	4,518187
70	13,165216	3,628863
75	13,165022	2,771269
80	13,164134	1,998983
85	13,163827	1,230500
90	13,162792	0,453599
95	13,155477	-0,271341
100	13,152577	-0,993235
105	13,071896	-1,598641
110	13,070948	-2,130570
115	12,970195	-2,650774
120	12,953077	-3,133440
125	12,941899	-3,547416
130	12,887563	-4,003256
135	12,852967	-4,421657
140	12,850308	-4,835240
145	12,753493	-5,244279
150	12,749636	-5,649822
155	12,650308	-5,856516
160	12,553540	-6,131855
165	12,043158	-6,452635
170	11,318955	-6,676465
175	10,229956	-6,775621
180	9,922344	-7,058307

Realizado por: Autores

en el desarrollo de esta prueba se observó un calentamiento anormal en la bomba que no se presentó en las pruebas anteriores, por lo que se detuvo la prueba al minuto 180 en el cual se alcanzó una temperatura de  $-7^{\circ}\text{C}$ , evidentemente en esta prueba no se logró alcanzar la temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$  debido a las excesivas pérdidas que se producen en el sistema cuando la válvula se encuentra abierta solo el 25%, esto se observa en una disminución del caudal presentándose baja transferencia de calor lo que produce a su vez congelamiento en la bomba y en el ducto de baja presión de la unidad condensadora.





**Figura 8-3:** Congelamiento en el conducto de baja de la unidad condensadora

Realizado por: Autores

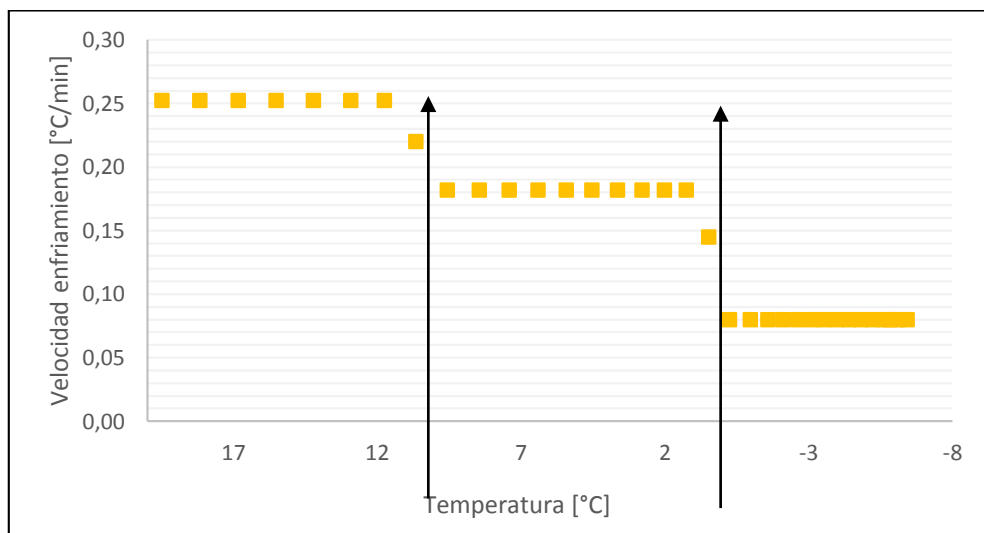


**Figura 9-3:** Congelamiento en la bomba

Realizado por: Autores

Velocidad de enfriamiento promedio:

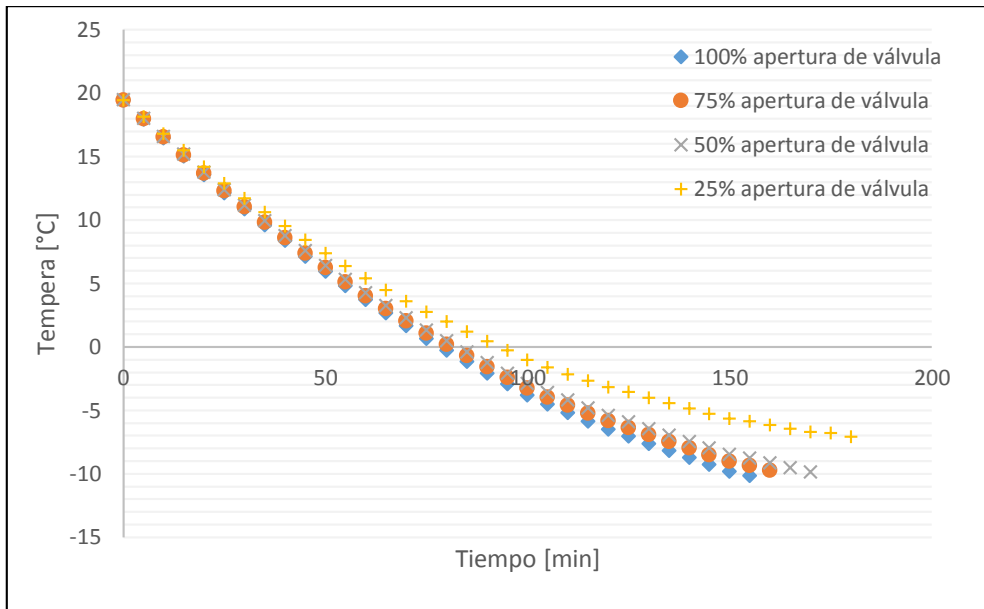
$$V_{enf} = \frac{|-7,05 - 19,46|}{180} = 0,1472 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$$



**Gráfico 13-3:** Variación de velocidad de enfriamiento prueba N°12

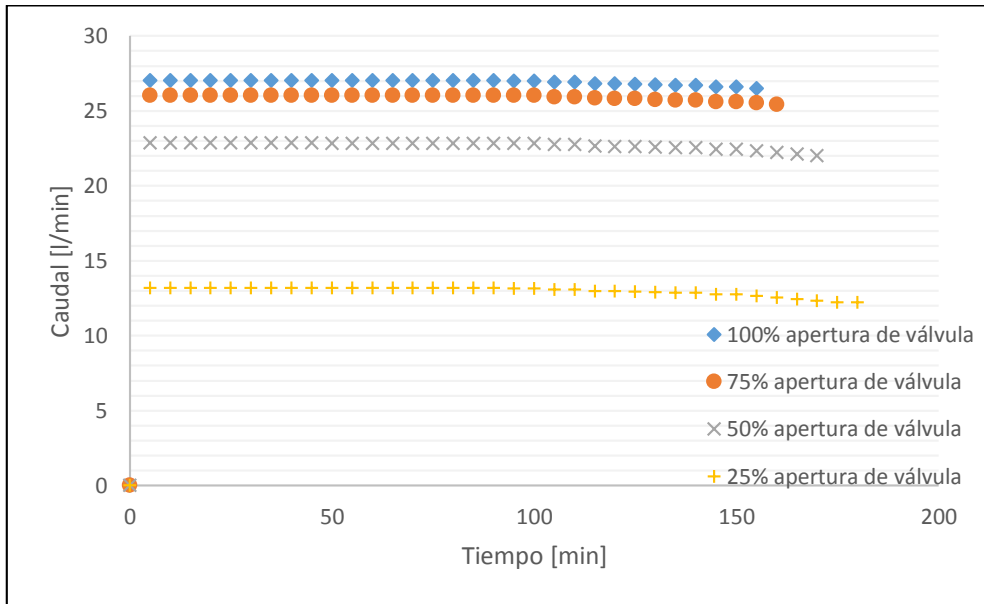
Realizado por: Autores

### 3.2.8 Curvas de enfriamiento para la solución de propilenglicol al 30%



**Gráfico 14-3:** Curvas de enfriamiento temperatura vs tiempo para solución al 30%

Realizado por: Autores



**Gráfico 15-3:** Curvas de enfriamiento caudal vs tiempo para solución al 30%

Realizado por: Autores

A medida que se disminuye el caudal de recirculación al variar la apertura de la válvula se produce una menor transferencia de calor eso se refleja en que se necesita de mayor tiempo para llegar a la misma temperatura.

## CAPITULO IV

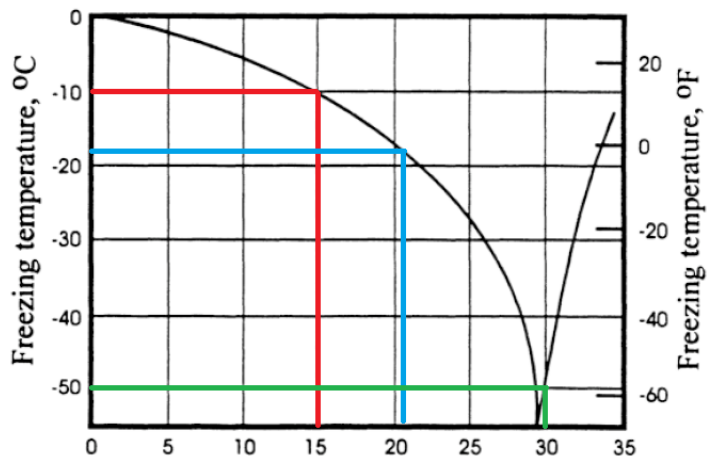
### 4 COMPARACION DEL COMPORTAMIENTO DE LA SOLUCION DE CaCl<sub>2</sub> Y PROPILENGLICOL

En este capítulo se analizó las curvas de enfriamiento de las dos soluciones acuosas en contraste con las pruebas realizadas a las mismas condiciones de composición al 15%, 21% y 30% de concentración tanto del CaCl<sub>2</sub> y de propilenglicol.

A continuación se muestran las gráficas de comparación del comportamiento del caudal y de la temperatura, las mismas que varían al transcurrir el tiempo y al variar el porcentaje de apertura de la válvula, en la comparación de caudal de las gráficas se determina que la salmuera de cloruro de calcio se enfría en menor tiempo que la salmuera de cloruro de propilenglicol.

#### 4.1 Temperatura de congelación de la solución para cada concentración

Debido a propiedades físicas y químicas del cloruro de calcio se observa en la siguiente grafica que para cada concentración de la solución es posible alcanzar temperaturas menores a los 10°C



**Gráfico 16-4:** Temperatura de congelación de la solución de CaCl<sub>2</sub>

Fuente: STOECKER, 1998, p.656

Luego de analizar los gráficos de muestran el comportamiento de las dos soluciones en estudio se determina que la solución de cloruro de calcio puede alcanzar temperaturas menores que las soluciones de propilenglicol para la misma concentración, como se lo muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 1-4:** Temperatura de congelación correspondiente a cada concentración.

Concentración	Propilenglicol	CaCl <sub>2</sub>
15%	- 4	-10
21%	- 7	-18
30%	-12	-50

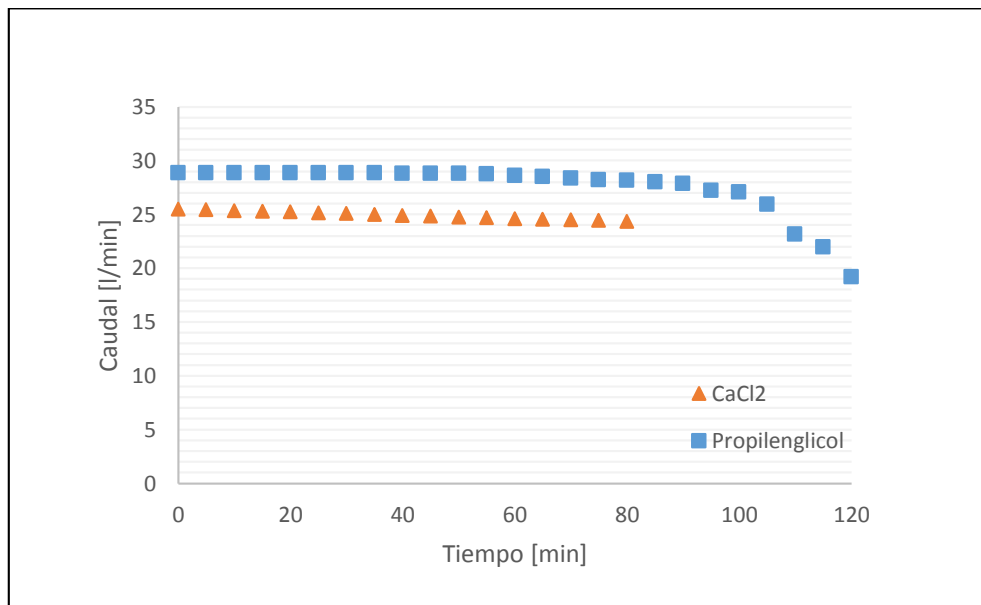
Realizado por: Autores

#### 4.2 Solución al 15% de concentración.

Una vez realizada las pruebas con la solución a base de propilenglicol a una concentración de 15% y a las distintas estrangulaciones de la válvula de esfera se procede a realizar la comparación con los datos del comportamiento de la solución a base de CaCl<sub>2</sub>.

##### 4.2.1 Análisis al 15% de concentración y 100% de apertura de válvula.

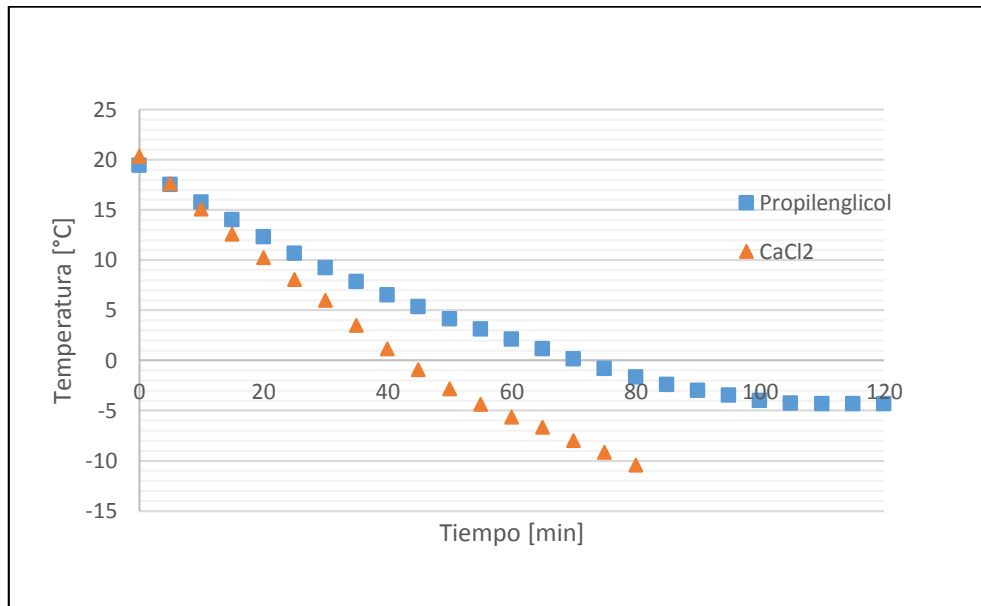
A continuación se muestra las gráficas del comportamiento del caudal de las dos soluciones en función del tiempo, en donde notamos claramente que con la solución de propilenglicol el caudal es mayor y se mantiene constante hasta el minuto 100 en el que la temperatura empieza a variar de manera lenta, hasta llegar a ese punto el caudal se mantiene constante y a partir de ese instante tiende a decrecer de forma muy rápida.



**Gráfico 2-4:** Caudal para la solución al 15% y válvula al 100% de apertura

Realizado por: Autores

En cuanto al CaCl<sub>2</sub> el caudal empieza en 25,49 l/min y varía hasta 24,38 l/min, caso contrario con la solución de propilenglicol que empieza en 28,88 l/min hasta 27,10 l/min en el cual la temperatura ya no varía a partir de -4.3 °C.



**Gráfico 3-4:** Temperatura para la solución al 15% y válvula al 100% de apertura

Realizado por: Autores

En cuanto a la temperatura podemos constatar que con la solución de base CaCl<sub>2</sub> se alcanza una temperatura de -10 °C en un tiempo de 80 minutos mientras que con el propilenglicol llegamos alcanzar una temperatura de -4,3 °C en 105 minutos, como se observa existe una variación en el tiempo ya que con CaCl<sub>2</sub> se llega a -4,3 °C aproximadamente en 55 minutos por lo cual sabemos que se enfría más rápido con la sal muera en base CaCl<sub>2</sub> que con el propilenglicol.

Las temperatura obtenida durante la experimentación es la temperatura mínima a las que se puede enfriar la solución antes de producir la congelación de la salmuera, para este porcentaje de concentración de la solución a base de propilenglicol se obtiene valores cercanos a los -5°C que es un valor cercano al obtenido en la experimentación..

En cuanto a la velocidad de enfriamiento existen marcadas diferencias las cuales se las expone a continuación en la tabla en el que podemos observar que el error en cuanto a la velocidad de enfriamiento aumenta en relación al tiempo y a las temperaturas máximas de enfriamiento que ambas soluciones pueden alcanzar.

**Tabla 2-4: Comparación de la velocidad de enfriamiento concentración 15% válvula 100%**

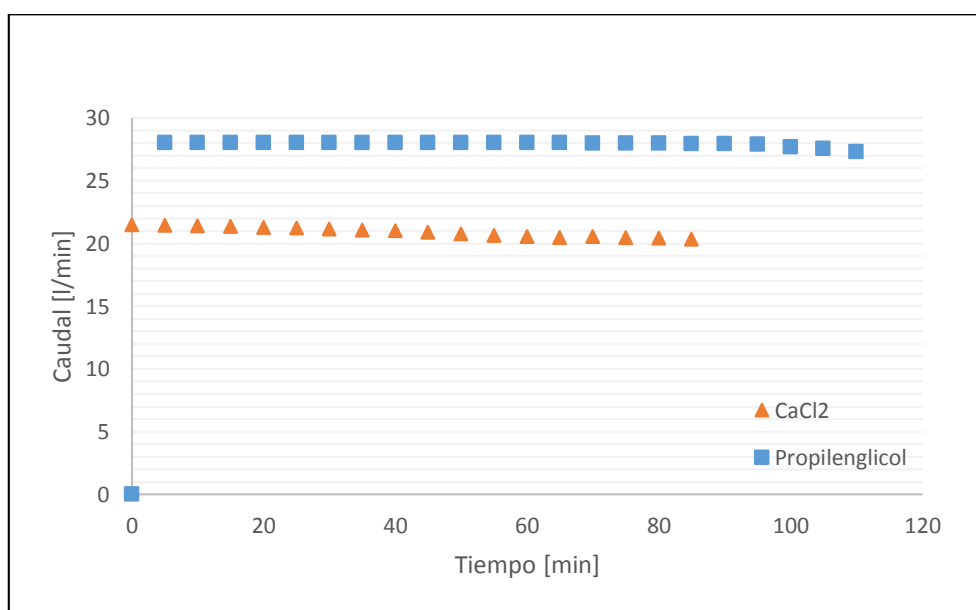
Temperatura [°C]	V enfr. CaCl <sub>2</sub> [°C/ min]	V enfr. Propilenglicol [°C/ min]	Error [%]
20 a 10	0,506	0,351	30,6
10 a 0	0,462	0,226	51,0
0 a -4	0,343	0,116	66,1

Realizado por: Autores

Luego del análisis de las gráficas de congelación de la salmuera se determina que la solución de propilenglicol no alcanza la temperatura de -10°C si no la mínima fue de -4,3 por lo cual se nota claramente en la tabla que la velocidad de enfriamiento del CaCl<sub>2</sub> es más rápida que la del propilenglicol.

#### 4.2.2 Análisis al 15% de concentración y 75% de apertura de válvula.

En la figura se puede observar el comportamiento del caudal para ambas soluciones variando la apertura de la válvula a 75% a la misma concentración de 15% en el que el CaCl<sub>2</sub> varía desde 21,39 l/min a 20,43 l/min y del propilenglicol la variación va desde 28 l/min a 27,28 l/min, el caudal del CaCl<sub>2</sub> decrece de manera muy notable en contraste a la apertura de 100% de la válvula en el que el caudal es de 25,49 l/min dándonos una variación de 4,1 l/min mientras que con el propilenglicol tiene una leve variación de 0,88 l/min ya que con el 100% de apertura el caudal fue de 28,88 l/min.



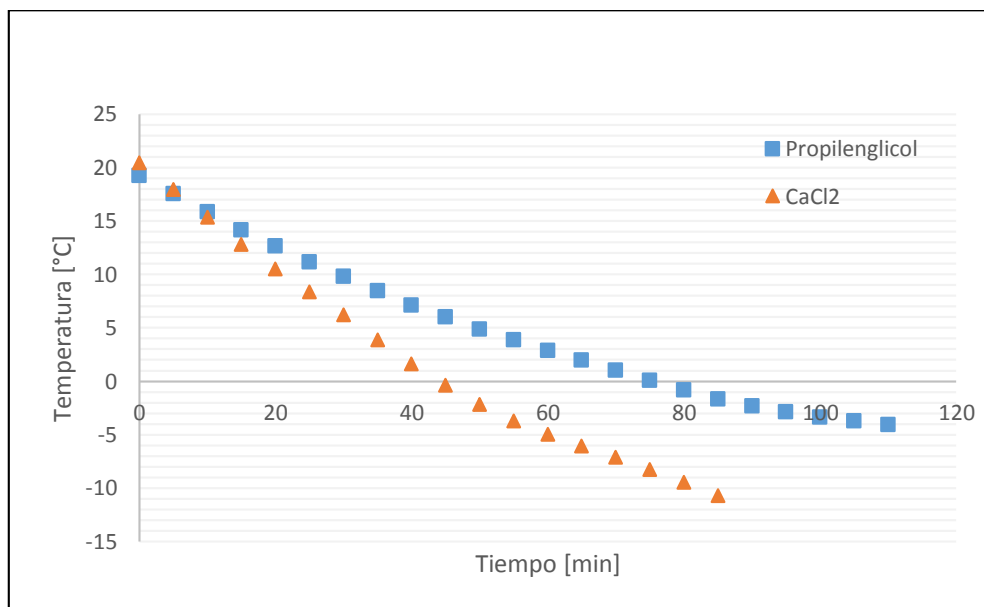
**Gráfico 4-4: Caudal para la solución al 15% y válvula al 75% de apertura**

Realizado por: Autores

El incremento de la estrangulación de la válvula produce una diferencia del caudal más notable, ya que la prueba se inició con un caudal 21,39 l/min con CaCl<sub>2</sub> y con propilenglicol con un caudal de 28 l/min una diferencia de 6.61 l/min lo cual implica que el fluido con concentración de propilenglicol presenta mejores propiedades en cuanto a fluidez mientras que el CaCl<sub>2</sub> al aumentar la estrangulación tienen mayor influencia sobre el caudal.

Las curvas de comportamiento de la temperatura en función al tiempo con la concentración del 15% de ambas soluciones y 75% de apertura de la válvula en las cuales se constató que con CaCl<sub>2</sub> se pudo alcanzar -10 °C en 85 minutos 5 minutos más que con la apertura de 100% y con el propilenglicol se llegó a obtener una temperatura de -4 °C en 110 minutos 5 minutos adicionales que con la válvula al 100%, para ambas soluciones existió un aumento de 5 minutos en el tiempo de enfriamiento al aumentar la estrangulación.

Existe una pequeña concordancia de valores de temperatura durante los primeros 10 minutos de toma de datos pasado los mismo empieza a variar por ende también varía la velocidad de enfriamiento.



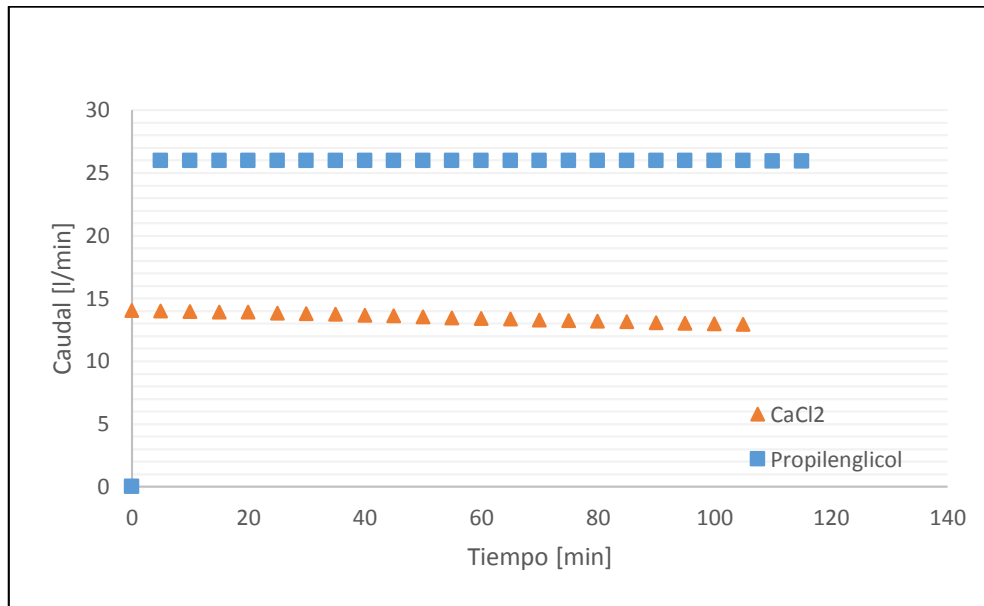
**Gráfico 5-4:** Temperatura para la solución al 15% y válvula al 75% de apertura

Realizado por: Autores

#### 4.2.3 *Análisis al 15% de concentración y 50% de apertura de la válvula.*

Para la estrangulación al 50% la diferencia del caudal es mayor como podemos observar en la figura del comportamiento del caudal para ambas composiciones el caudal del propilenglicol es mayor al del CaCl<sub>2</sub> lo cual nos permitió trabajar de una mejor manera siendo el caudal de la

solución de propilenglicol casi el doble de la del CaCl<sub>2</sub> ya que el caudal con el que se trabajó en esta prueba para el propilenglicol es de 25,99 l/min a 24,94 l/min y para el CaCl<sub>2</sub> fue de 14,05 l/min a 12,93 l/min.



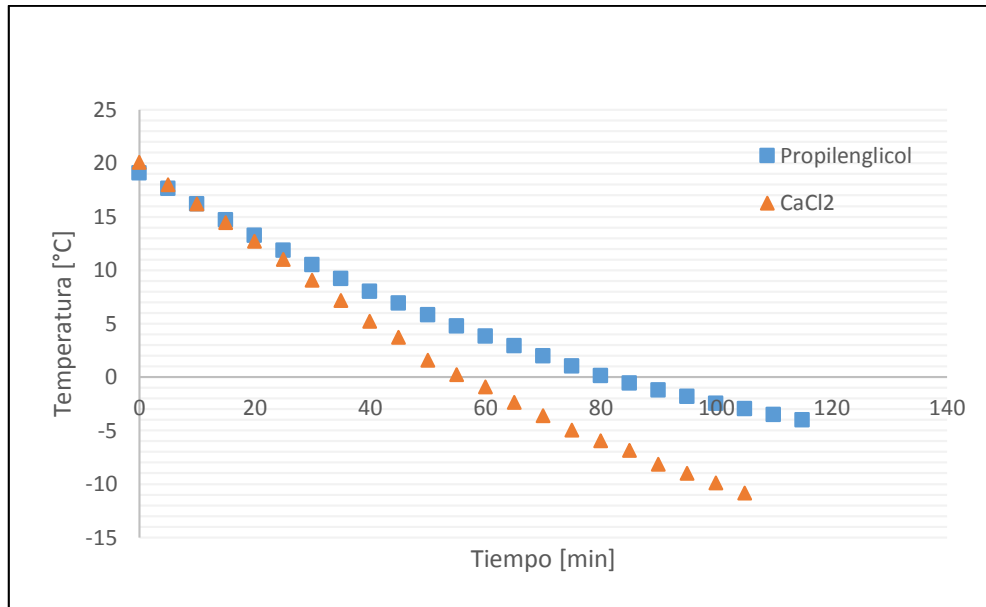
**Gráfico 6-4:** Caudal de la solución al 15% y válvula al 50% de apertura

Realizado por: Autores

Con respecto a la estrangulación a 75% de la válvula existe una variación de 7,44 l/min en el caudal para la solución de CaCl<sub>2</sub> y para la solución de propilenglicol es de 2,02 l/min como podemos observar la variación del caudal según la estrangulación de la válvula es mayor para la solución de CaCl<sub>2</sub> por lo cual se puede aseverar que a mayor estrangulación de la válvula decrece más el caudal para ambas soluciones pero con mayor notoriedad para la solución de CaCl<sub>2</sub>.

Para la temperatura los datos obtenidos en la prueba realizada con propilenglicol se asemejan más a los del CaCl<sub>2</sub> para la misma composición y para la estrangulación de 50% de la válvula ya que los datos coinciden hasta los primeros 30 minutos de la prueba pasado este tiempo empiezan a variar.





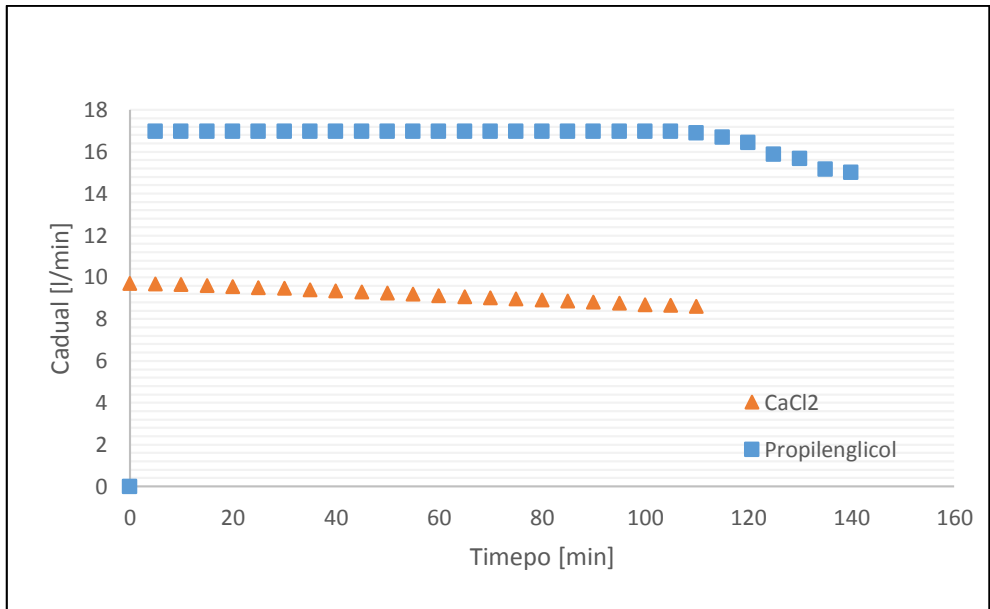
**Gráfico 7-4:** Temperatura para la solución al 15% y válvula al 50% de apertura

Realizado por: Autores

Con la solución de propilenglicol se alcanzó una temperatura de  $-4,0003\text{ }^{\circ}\text{C}$  en 115 minutos mientras que con la solución de  $\text{CaCl}_2$  se llegó a  $-10,82\text{ }^{\circ}\text{C}$  en 105 minutos podemos observar que con el  $\text{CaCl}_2$  se alcanzó la misma temperatura que la del propilenglicol que son los  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente en 75 minutos dándonos una diferencia alrededor de 40 minutos en cuanto al tiempo de enfriamiento.

#### 4.2.4 Análisis al 15% de concentración y 25% de apertura de válvula.

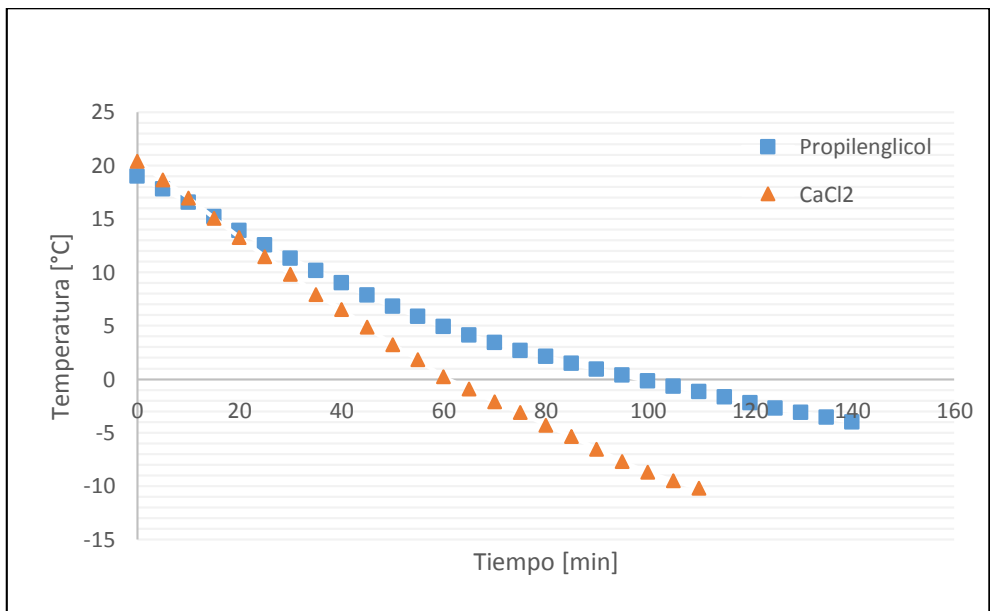
En la siguiente figura se puede apreciar el comportamiento del caudal para ambas soluciones variando la apertura de la válvula a 25% en el que el  $\text{CaCl}_2$  varía desde  $9,73\text{ l/min}$  a  $8,63\text{ l/min}$  en y del propilenglicol la variación va desde  $16,98\text{ l/min}$  a  $15,01\text{ l/min}$ , el caudal del  $\text{CaCl}_2$  decrece de manera más notable en comparación a la apertura de 50% de la válvula en donde el caudal fue de  $14,05\text{ l/min}$  dándonos una variación de  $4,32\text{ l/min}$  mientras que con el propilenglicol tiene una leve variación de  $9,01\text{ l/min}$  ya que con el 50% de apertura el caudal fue de  $25,99\text{ l/min}$ .



**Gráfico 8-4:** Caudal para la solución al 15% y válvula al 25% de apertura

Realizado por: Autores

En la figura se ilustran las curvas de comportamiento de la temperatura en función al tiempo con la concentración del 15% de ambas soluciones y 25% de apertura de la válvula en las cuales se constató que con CaCl<sub>2</sub> se pudo alcanzar -10 °C en 110 minutos 5 minutos más que con la apertura de 50% y con el propilenglicol se llegó a obtener una temperatura de -4 °C en 140 minutos 25 minutos más que con la válvula al 50%, para ambas soluciones existió un aumento en el tiempo de enfriamiento al aumentar la estrangulación siendo mayor en la del propilenglicol.



**Gráfico 9-4:** Temperatura para la solución al 15% y válvula al 25% de apertura

Realizado por: Autores

Existe una concordancia de valores de temperatura durante los 30 minutos iniciales de la toma de datos; una vez pasado los mismos empieza a variar por ende también varía la velocidad de enfriamiento.

### **4.3 Soluciones al 21% de concentración.**

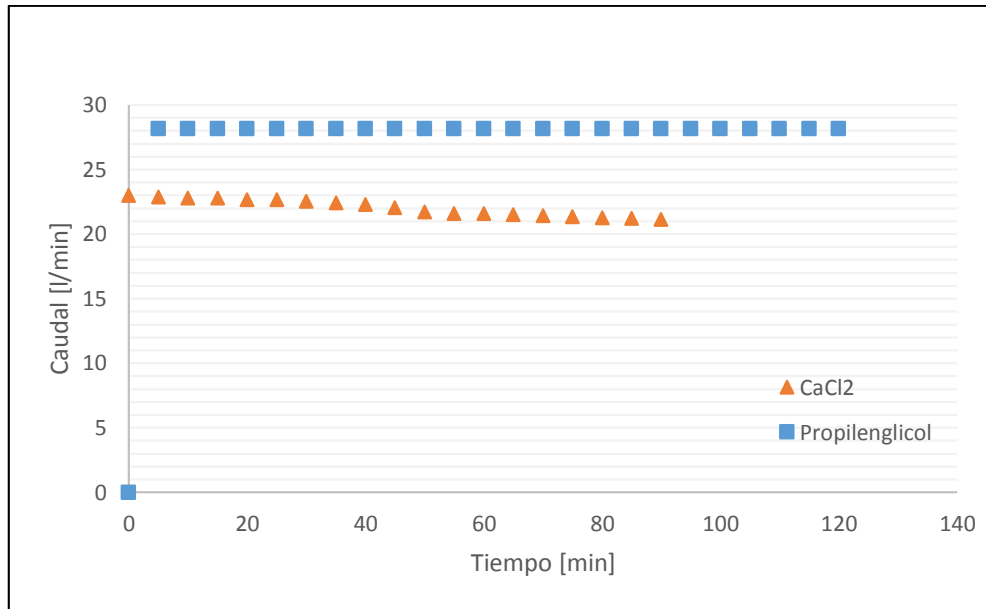
A continuación se muestra la comparación de la solución de base propilenglicol con la solución acuosa en base CaCl<sub>2</sub>, a una concentración de 21% para ambas soluciones y a las distintas estrangulaciones de la válvula de globo 100%, 75%, 50%, 25% usando los datos obtenidos en la experimentación y los datos que se tienen del trabajo de la anterior investigación realizada en el mismo equipo a la misma concentración y a las mismas estrangulaciones con la solución con base CaCl<sub>2</sub>.

#### *4.3.1 Análisis al 21% de concentración y 100% de apertura de la válvula.*

A continuación se muestra en la figura las gráficas de las dos soluciones con el comportamiento del caudal en función del tiempo en el que podemos ver que con el propilenglicol el caudal sigue siendo mayor comparándola con la solución con base CaCl<sub>2</sub> en la cual el caudal empieza en 23,01 l/min y varía hasta 21,16 l/min en un tiempo aproximado de 90 minutos en el cual la temperatura ya no varía en cambio con propilenglicol empieza en 28,18 l/min hasta 28,16 l/min en un tiempo de 120 minutos en el cual la temperatura ya no varía.

Como podemos apreciar al aumentar la concentración por volumen para ambas soluciones existe una diferencia en cuanto al caudal, de la solución de CaCl<sub>2</sub> de aproximadamente 2 l/min en contraste con la concentración de 15 % lo cual implica que el fluido se va tornando más viscoso por ende disminuye el caudal ya que existe mayor oposición al flujo.

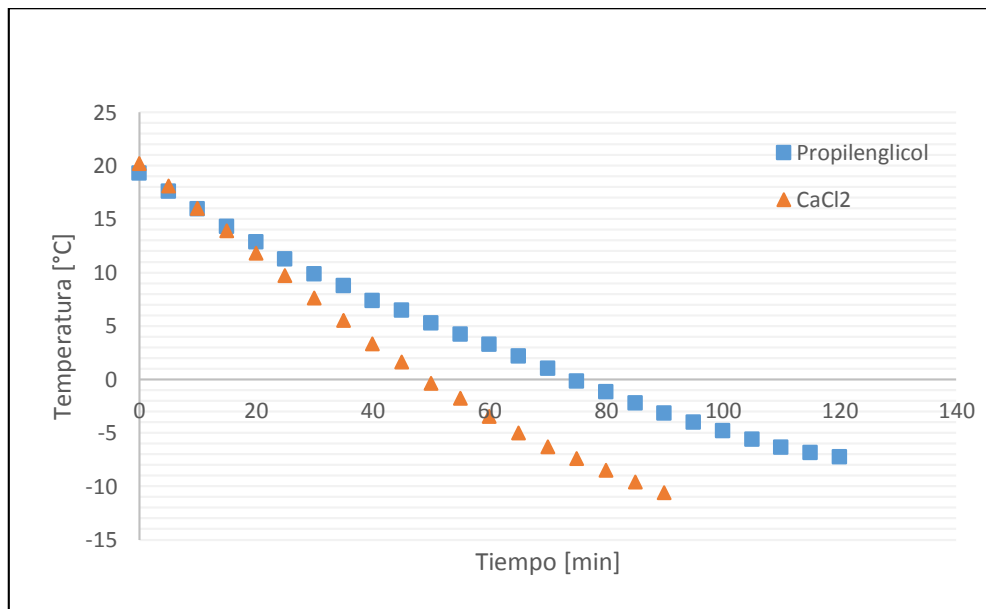
En cuanto se refiere a la solución de propilenglicol la variación en comparación a la concentración de 15% es mínima de 0,7 l/min por lo cual el fluido se comporta de mejor manera permaneciendo casi en su estado inicial, es decir no aumenta su viscosidad ya que no se opone a fluir.



**Gráfico 10-4:** Caudal para la solución al 21% y válvula al 100% de apertura

Realizado por: Autores

En cuanto a la temperatura podemos apreciar que mientras mayor sea la concentración de la solución acuosa esta va aumentando la temperatura de enfriamiento, dependiendo de la concentración por volumen de CaCl<sub>2</sub> o propilenglicol para cada solución.



**Gráfico 17-4:** Comparación de la temperatura concentración 21% válvula 100%

Realizado por: Autores

En la figura podemos apreciar que con la solución de base CaCl<sub>2</sub> se alcanza una temperatura de -10,57 °C en un tiempo de 90 minutos mientras que con el propilenglicol llegamos a alcanzar una temperatura de -7,2 °C en 120 minutos, como podemos constatar existe una variación en el tiempo

de enfriamiento en relación a la composición de 15% ya que existe una variación de 10 minutos en comparación con CaCl<sub>2</sub> y con el propilenglicol de aproximadamente 5 minutos para alcanzar la temperatura de -4,3 ° C que fue la máxima temperatura de enfriamiento alcanzada con 15% de concentración. Con los datos obtenidos vemos que sigue existiendo un enfriamiento más rápido con la sal muera en base CaCl<sub>2</sub> que con el propilenglicol y que el tiempo de enfriamiento aumenta según la concentración.

Las temperaturas de enfriamiento obtenidas durante la experimentación son las temperaturas máximas a las que pueden enfriar las soluciones con este porcentaje de concentración que lo analizamos en las curvas de concentración de compuesto por volumen, que se muestra a continuación.

Como podemos apreciar la temperatura máxima de enfriamiento para el propilenglicol al 21% de concentración es de -8 °C, que es la temperatura a la cual se llegó realizando las pruebas experimentales para esta concentración.

En cuanto a la comparación de las velocidades de enfriamiento podemos observar en la tabla que los errores ya no son tan altos como en la concentración de 15% ya que los valores de las velocidades de enfriamiento de ambas soluciones empiezan a ser más cercanos pero sigue siendo mayor la velocidad de enfriamiento del CaCl<sub>2</sub>.

**Tabla 3-4:** Comparación de la velocidad de enfriamiento concentración 21% válvula 100%

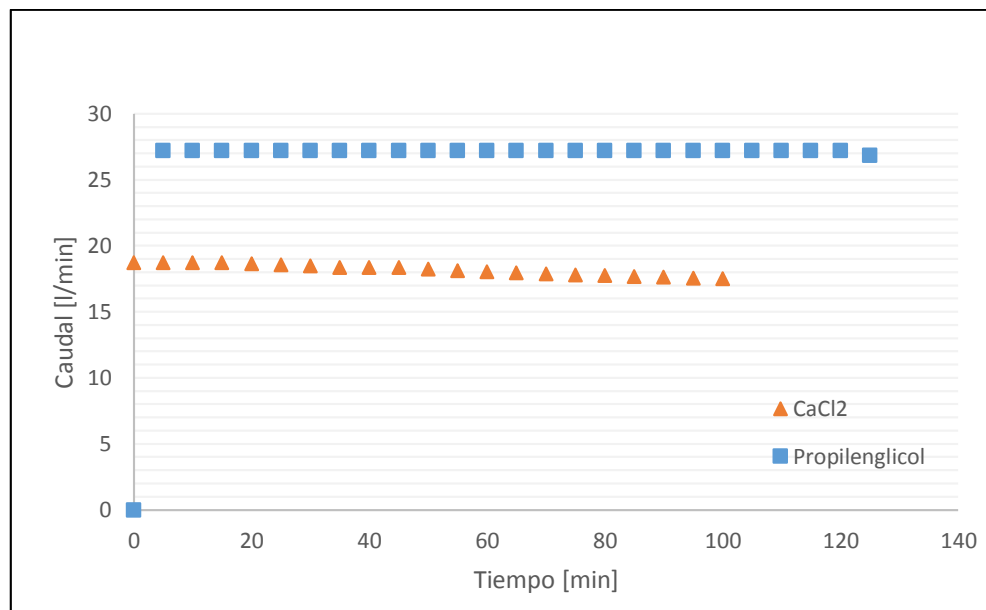
Temperatura [°C]	V enfr. CaCl <sub>2</sub> [°C/ min]	V enfr. Propilenglicol [°C/ min]	Error [%]
20 a 10	0,420	0,323	23,0
10 a 0	0,405	0,220	45,6
0 a -7	0,280	0,157	43,9

Realizado por: Autores

#### 4.3.2 *Análisis al 21% de concentración y 75% de apertura de la válvula.*

En la figura se puede observar el comportamiento del caudal para ambas soluciones variando la apertura de la válvula a 75% a la misma concentración de 21% en el que el CaCl<sub>2</sub> varía desde 18,71 l/min a 17,51 l/min en un aproximado de 100 minutos y del propilenglicol la variación va desde 27,19 l/min a 26,85 l/min en 125 minutos la diferencia entre la válvula al 100% de apertura con l del 75 % de apertura no es muy grande en comparación con el propilenglicol pero en cuanto a la solución de CaCl<sub>2</sub> si es notoria.

Seguimos constatando que mientras más aumenta la estrangulación de la válvula la diferencia del caudal es más notable.

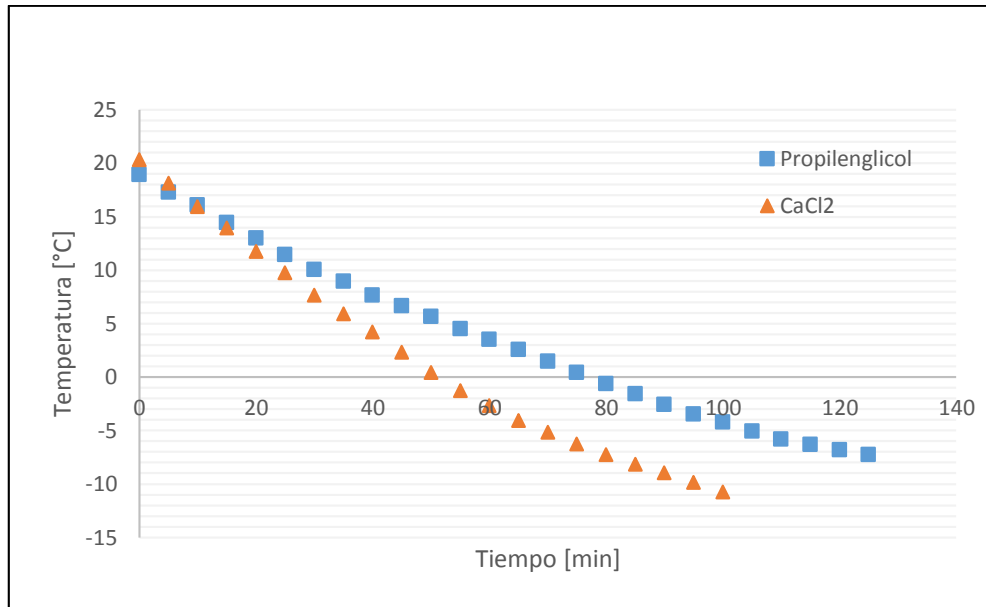


**Gráfico 12-4:** Caudal para la solución al 21% y válvula al 75% de apertura

Realizado por: Autores

A continuación analizaremos el comportamiento de la temperatura en ambas soluciones en la figura podemos observar las curvas de comportamiento de la temperatura en función al tiempo con la concentración del 21% y 75% de apertura de la válvula en las cuales se constató que con CaCl<sub>2</sub> se pudo alcanzar -10 °C en 100 minutos 10 minutos más que con la apertura de 100% y con el propilenglicol se llegó a obtener una temperatura de -7,22 °C en 125 minutos 5 minutos más que con la válvula al 100%, para ambas soluciones existió un aumento en el tiempo de enfriamiento al aumentar la estrangulación.

También podemos observar que durante los primeros 25 minutos de prueba y de toma de datos existe una pequeña concordancia de valores de temperatura pasado los mismo empieza a variar por ende también varía la velocidad de enfriamiento.



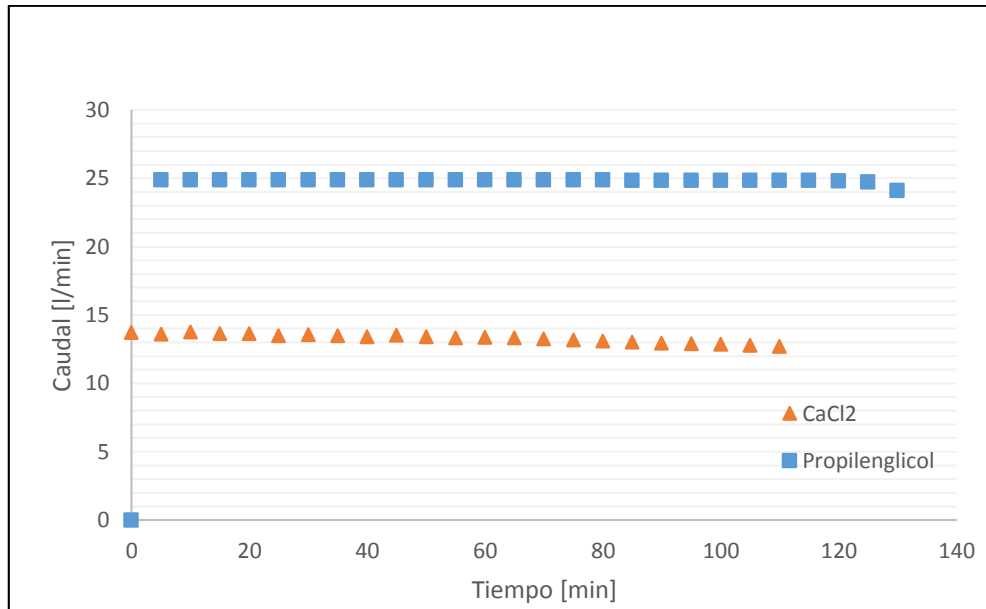
**Gráfico 13-4:** Temperatura para la solución al 21% y válvula al 75% de apertura

Realizado por: Autores

#### 4.3.3 *Análisis al 21% de concentración y 50% de apertura de la válvula.*

Como se ha venido constatando al aumentar la estrangulación al 50% la diferencia del caudal es mayor como podemos observar en la figura del comportamiento del caudal para ambas composiciones el caudal del propilenglicol es mayor al del CaCl2 siendo el caudal de la solución de propilenglicol 11.16 l/min mayor al de CaCl2 ya que el caudal con el que se trabajó en esta prueba para el propilenglicol es de 24,89 l/min a 24,12 l/min y para el CaCl2 fue de 13,73 l/min a 12,73 l/min.

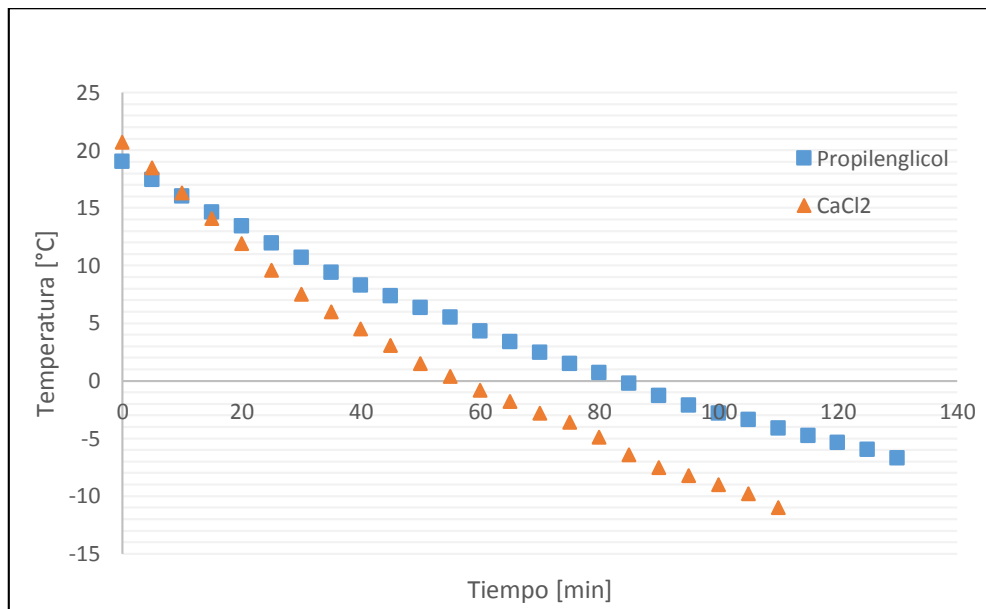
Al comparar los resultados de las dos estrangulaciones, en la estrangulación a 75% de la válvula existe una variación de 5,22 l/min en el caudal para la solución de CaCl2 y para la solución de propilenglicol es de 2,3 l/min como podemos observar mientras más aumenta la estrangulación de la válvula decrece más el caudal para ambas soluciones pero con mayor notoriedad para la solución de CaCl2.



**Gráfico 14-4:** Caudal para la solución al 21% y válvula al 50%.de apertura

Realizado por: Autores

Seguidamente analizaremos el comportamiento de la temperatura en ambas soluciones por medio de las curvas de enfriamiento que nos indican el comportamiento de la temperatura en función del tiempo



**Gráfico 15-4:** Temperatura para la solución al 21% y válvula al 50% de apertura

Realizado por: Autores

Para las soluciones con la concentración del 21% y 50% de apertura de la válvula en las cuales se observa que con CaCl2 se alcanzó -11 °C en 110 minutos 10 minutos más que con la apertura de 75% y con el propilenglicol se llegó a obtener una temperatura de -6,69 °C en 130 minutos 5



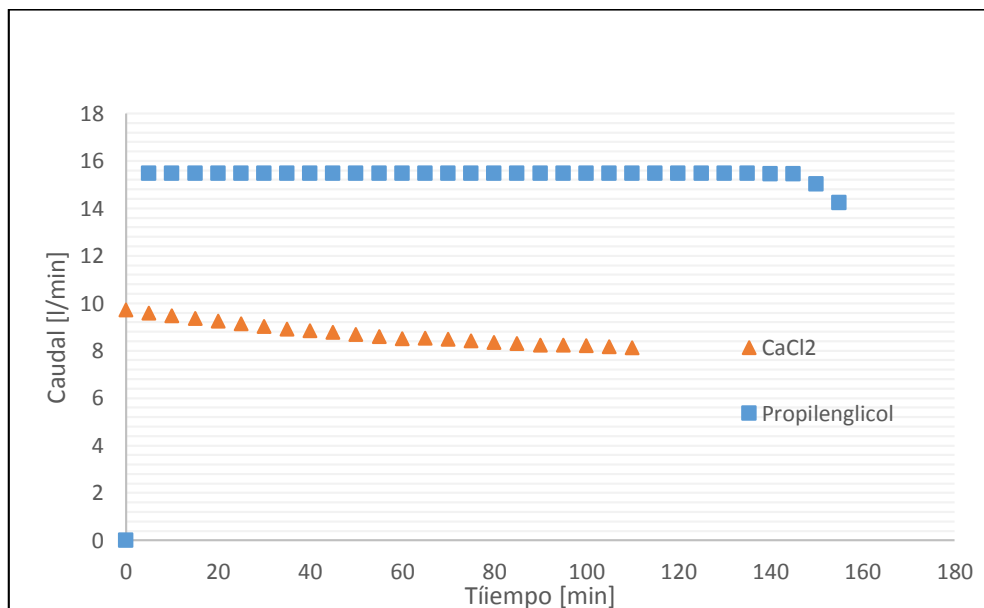
minutos más que con la válvula al 75%, para ambas soluciones existió un aumento en el tiempo de enfriamiento al aumentar la estrangulación y la variación de temperatura casi tiene una tendencia lineal debido a la velocidad de enfriamiento propia de cada solución.

También podemos observar que durante los primeros 30 minutos de prueba y de toma de datos existe una pequeña concordancia de valores en temperatura pasado los mismo empieza a variar por ende también varía la velocidad de enfriamiento.

#### 4.3.4 *Análisis al 21% de concentración y 25% de apertura de la válvula.*

En la figura se puede apreciar el comportamiento del caudal para ambas soluciones variando la apertura de la válvula a 25% a la misma concentración de 21 % en el cual el CaCl<sub>2</sub> varía desde 9,72 l/min a 8,12 l/min en y del propilenglicol la variación va desde 15,48 l/min a 14,23 l/min ahora podemos darnos cuenta que el caudal del CaCl<sub>2</sub> sigue siendo menor en comparación a la solución de propilenglicol.

Con el aumento de la estrangulación de la válvula la diferencia del caudal es más notable ya que se inició con un caudal 9,72 l/min con CaCl<sub>2</sub> y con propilenglicol con un caudal de 15,48 l/min una diferencia de 8,23 l/min al comparar podemos darnos cuenta que el fluido con concentración de propilenglicol sigue siendo el que presenta mejores propiedades en cuanto a flujo.

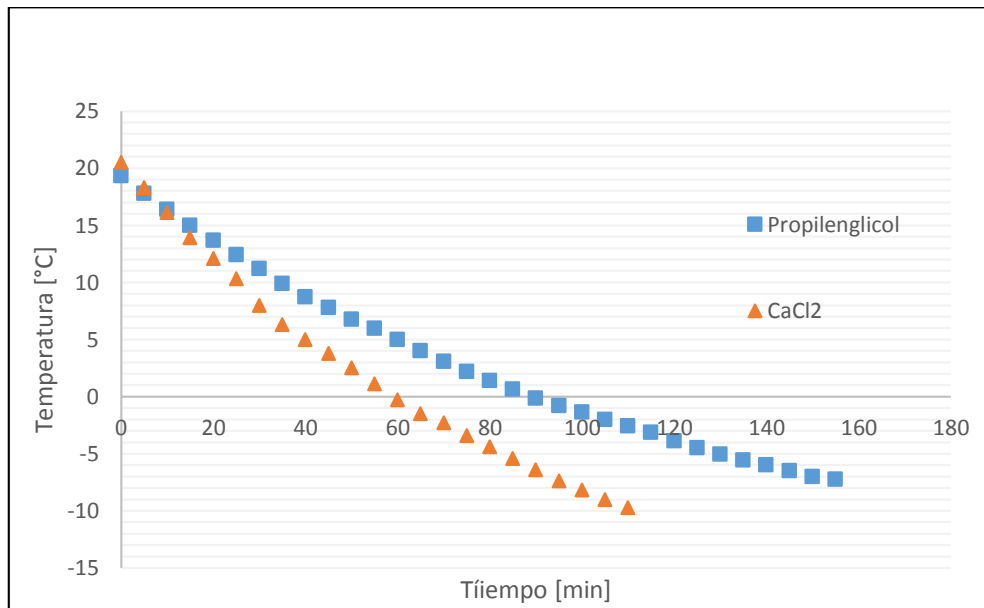


**Gráfico 16-4:** Caudal para la solución al 21% y válvula al 25% de apertura

Realizado por: Autores

En la figura se ilustran las curvas de comportamiento de la temperatura en función al tiempo con la concentración del 21% de ambas soluciones y 25% de apertura de la válvula en las cuales se observa que con CaCl<sub>2</sub> se pudo alcanzar -9,7 °C en 110 minutos igual que con la apertura de 50% y con el propilenglicol se llegó a obtener una temperatura de -7,22 °C en 155 minutos 25 minutos más que con la válvula al 50%, si lo comparamos con la concentración del 15 % es el mismo tiempo de diferencia de 25 minutos en el tiempo de enfriamiento de la apertura de 50% a la del 25%.

Sigue existiendo una concordancia de valores de temperatura durante los 30 minutos iniciales de la toma de datos para ambas soluciones; una vez pasado los mismos empieza a variar por ende también varía la velocidad de enfriamiento.



**Gráfico 17-4:** Temperatura para la solución al 21% y válvula al 25% de apertura

Realizado por: Autores

#### 4.4 Solución al 30% de concentración.

A continuación se detalla la comparación de la solución de base propilenglicol con la de CaCl<sub>2</sub>, a una concentración de 30% y a las distintas estrangulaciones de la válvula de globo 100%, 75%, 50%, 25% con los datos obtenidos en la experimentación y los que se tienen del trabajo de la anterior investigación realizada en el mismo equipo a la misma concentración y a las mismas estrangulaciones con la solución con base CaCl<sub>2</sub>.

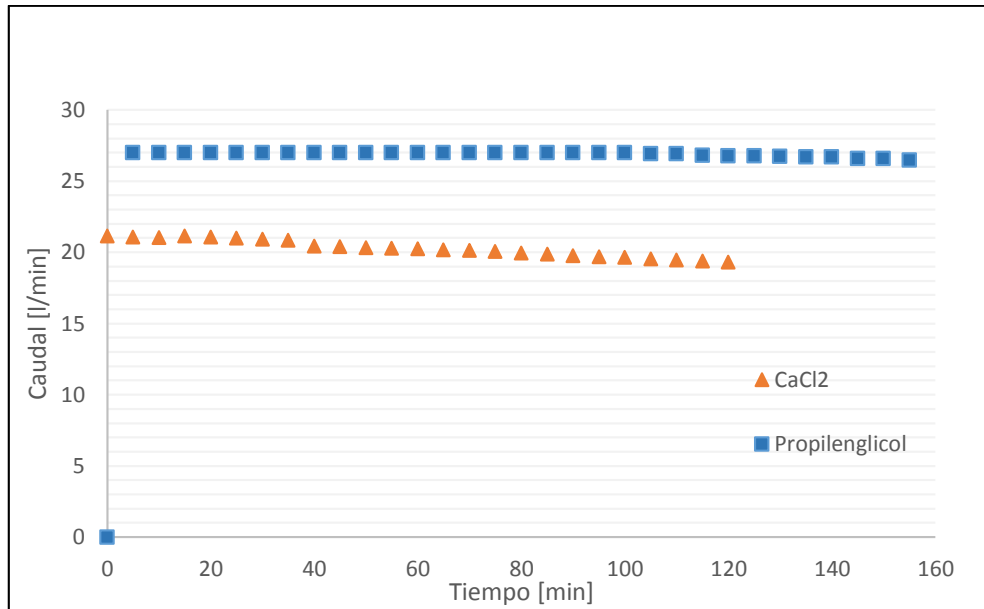
Primero se compara las curvas de enfriamiento en cuanto al comportamiento del caudal en función del tiempo y seguido las de temperatura en función del tiempo para cada una de las estrangulaciones de la válvula de globo.

#### 4.4.1 *Análisis al 30% de concentración y 100% de apertura de la válvula.*

En la siguiente figura se observa las gráficas de las dos soluciones con el comportamiento del caudal en función del tiempo se sigue cumpliendo lo constatado en las otras concentraciones, que con el propilenglicol el caudal sigue siendo mayor comparándola con la solución con base CaCl<sub>2</sub>, en la cual el caudal empieza en 21,15 l/min y varía hasta 19,34 l/min en un tiempo aproximado de 120 minutos en el que la temperatura ya no varía en cambio con propilenglicol empieza en 27,018 l/min y varía hasta 26,49 l/min en un tiempo de 155 minutos en el cual la temperatura ya no varía.

Se puede apreciar al aumentar la concentración por volumen para ambas soluciones existe una diferencia en cuanto al caudal, de la solución de CaCl<sub>2</sub> de aproximadamente 1,86 l/min en contraste con la concentración de 21 % y a la misma apertura de la válvula esto implica que entre la concentración de CaCl<sub>2</sub> aumenta el caudal con el que inicia la prueba disminuye porque al aumentar la concentración aumenta la viscosidad del fluido.

En cuanto se refiere a la solución de propilenglicol la variación en comparación a la concentración de 15% es de 1,162 l/min por lo cual el fluido sigue comportándose de mejor manera permaneciendo con un caudal casi constante ya que la variación según aumenta la concentración es mínima, es decir no aumenta su viscosidad ya que no se opone a fluir.



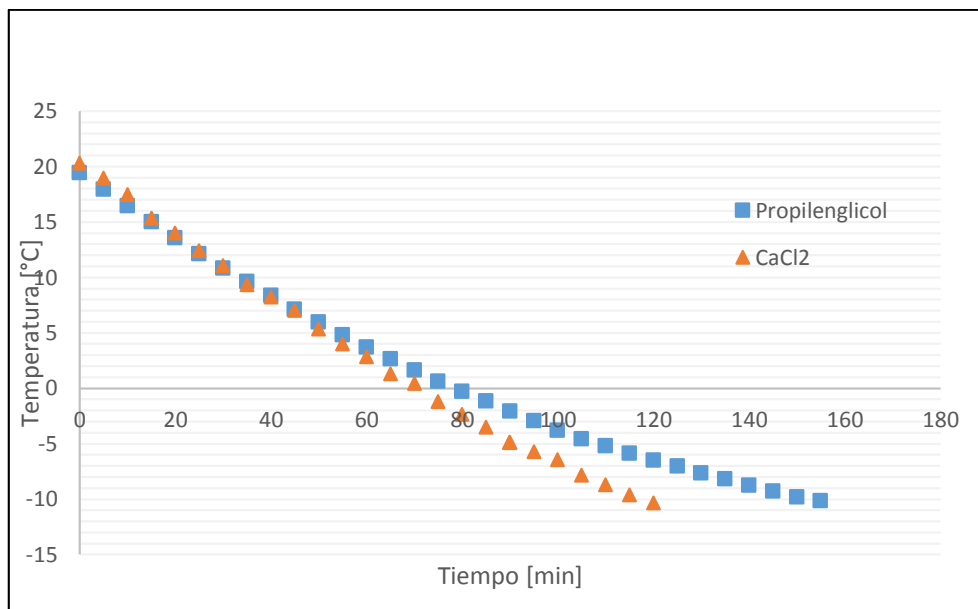
**Gráfico 18-4:** Caudal para la solución al 30% y válvula al 100% de apertura

Realizado por: Autores

Por otro lado en cuanto a la temperatura podemos observar que mientras mayor sea la concentración de la solución acuosa esta va aumentando la temperatura de enfriamiento, dependiendo de la concentración por volumen de CaCl<sub>2</sub> o propilenglicol para cada solución.

En la figura podemos apreciar que con la solución de base CaCl<sub>2</sub> se alcanza una temperatura de -10,3 °C en un tiempo de 120 minutos mientras que con el propilenglicol llegamos a alcanzar una temperatura de -10,13 °C en 155 minutos, comparando ambas curvas podemos constatar que existe una concordancia de valores casi similares durante 60 minutos pasado lo mismo empieza a variar lo cual implica que la velocidad de enfriamiento durante la primera hora de experimentación para ambas soluciones es la misma.

También se puede apreciar una variación en el tiempo de enfriamiento en relación a la composición de 21 % a la misma apertura de la válvula ya que existe una variación de 30 minutos en comparación con CaCl<sub>2</sub> y con el propilenglicol de aproximadamente 35 minutos para alcanzar la temperatura de -10,13 °C que fue la máxima temperatura de enfriamiento alcanzada con 30 % de concentración.



**Gráfico 19-4:** Temperatura para la solución al 30% y válvula al 100%

Realizado por: Autores

Las temperaturas de enfriamiento obtenidas durante la experimentación son las temperaturas máximas a las que pueden enfriar las soluciones con este porcentaje de concentración que lo analizamos en las curvas de concentración de compuesto por volumen, que se muestra a continuación.

Ahora mostraremos la tabla de comparación de las velocidades de enfriamiento para esta concentración en donde vemos que sigue bajando el error en cuanto a las otras concentraciones y existe una similitud de la velocidad de enfriamiento en cuanto a las temperaturas de 20 °C a 10 °C y de 10 °C a 0 °C pasadas estas temperaturas varia la velocidad de enfriamiento siendo menor para la solución de propilenglicol por ende el tiempo de enfriamiento para alcanzar la máxima temperatura de enfriamiento los -10 °C es mayor para el propilenglicol.

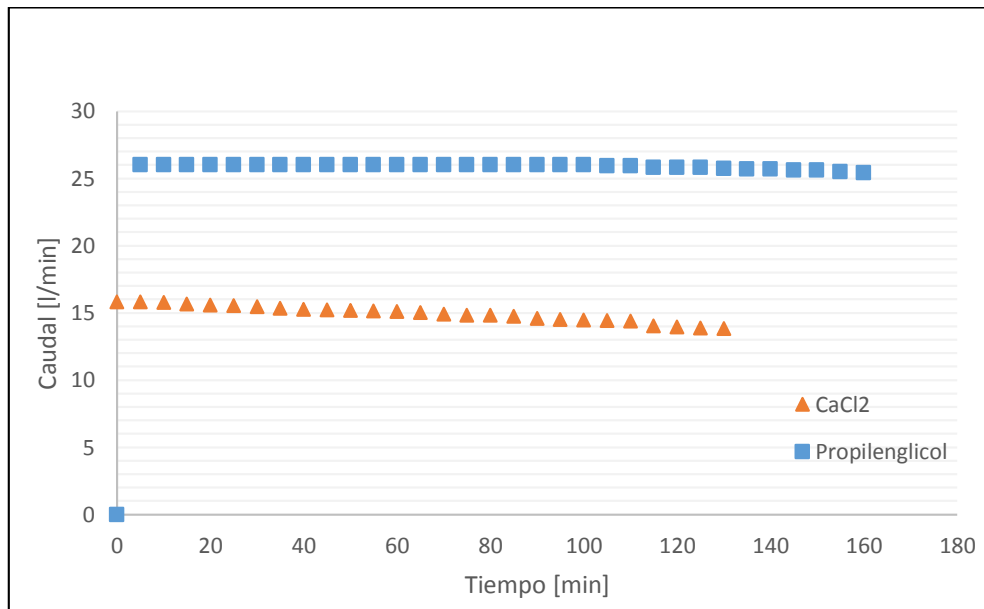
**Tabla 4-4:** Comparación de la velocidad de enfriamiento concentración 30% válvula 100%.

Temperatura [°C]	V enfr. CaCl2 [°C/ min]	V enfr. Propilenglicol [°C/ min]	Error [%]
20 a 10	0,308	0,286	7,14
10 a 0	0,254	0,224	11,8
0 a -10	0,203	0,131	35,4

Realizado por: Autores

#### 4.4.2 Análisis al 30% de concentración y 75% de apertura de la válvula.

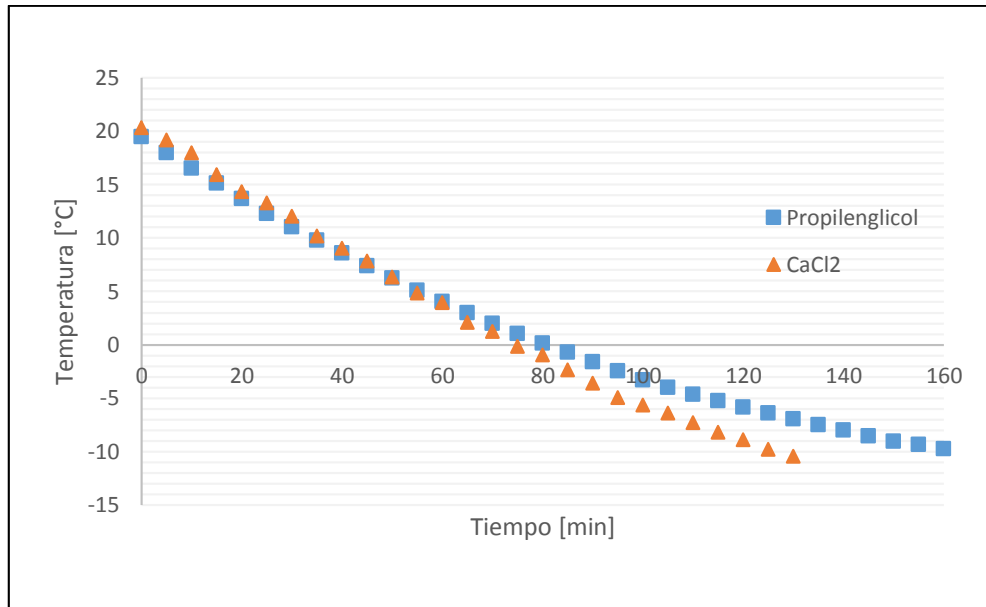
En la figura se puede observar el comportamiento del caudal para ambas soluciones variando la apertura de la válvula a 75% a la misma concentración de 30 % donde el CaCl<sub>2</sub> varía desde 15,82 l/min a 13,83 l/min en un aproximado de 130 minutos y del propilenglicol la variación va desde 26,03 l/min a 25,41 l/min en 160 minutos la diferencia entre la válvula al 100% de apertura con l del 75 % de apertura no es muy grande en comparación con el propilenglicol pero en cuanto a la solución de CaCl<sub>2</sub> si es notoria.



**Gráfico 20-4:** Caudal para la solución al 30% y válvula al 75% de apertura

Realizado por: Autores

Es apreciable en la gráfica el comportamiento de la temperatura para ambas soluciones, por medio de la figura comparamos las curvas de comportamiento de la temperatura en función al tiempo con la concentración del 30% y 75% de apertura de la válvula en las cuales se puede ver que con CaCl<sub>2</sub> se pudo alcanzar -10 °C en 130 minutos 10 minutos más que con la apertura de 100% y con el propilenglicol se llegó a obtener una temperatura de -10 °C en 160 minutos, 5 minutos más que con la válvula al 100%, para ambas soluciones existió un aumento en el tiempo de enfriamiento al aumentar la estrangulación.



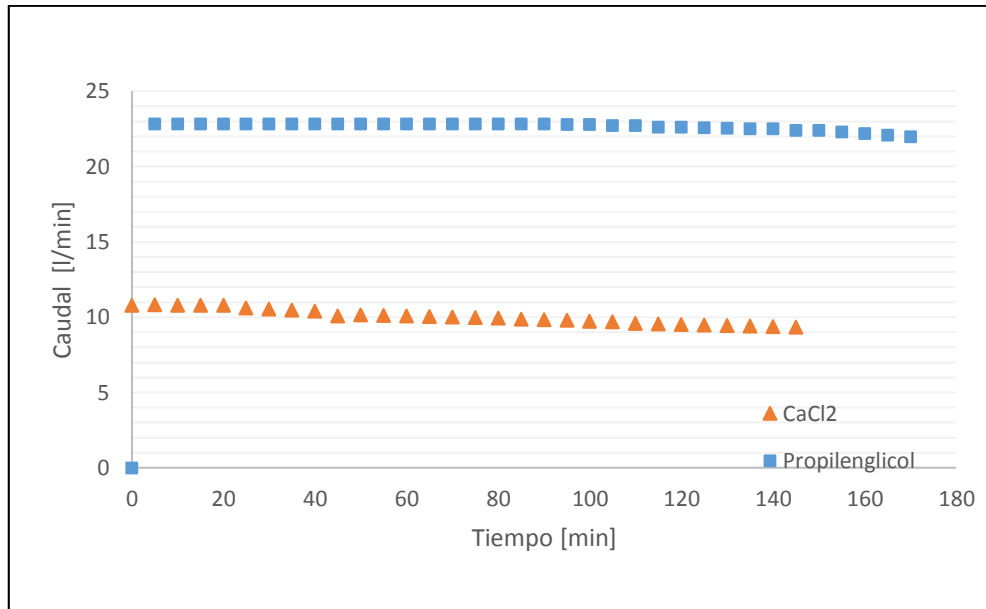
**Gráfico 21-4:** Temperatura para la solución al 30% y válvula al 75% de apertura

Realizado por: Autores

También podemos observar que durante los 80 minutos de prueba y de toma de datos existe una pequeña concordancia de valores de temperatura pasado los mismo empieza a variar por ende también varía la velocidad de enfriamiento por lo cual existe una velocidad de enfriamiento hasta las 80 minutos de similitud para ambas soluciones pasado este tiempo cambian los valores de las velocidades de enfriamiento.

#### 4.4.3 *Análisis al 30% de concentración y 50% de apertura de la válvula.*

Como se ha venido comprobando al aumentar la estrangulación de la válvula de globo al 50% la diferencia del caudal es mayor en cuanto a la diferencia entre la apertura de 100% y la de 75 % como podemos observar en la figura del comportamiento del caudal para ambas composiciones el caudal del propilenglicol es mayor al del CaCl2 siendo el caudal de la solución de propilenglicol 12,02 l/min mayor al de CaCl2 ya que el caudal con el que se trabajó en esta prueba para el propilenglicol es de 22,84 l/min con una variación a 21,99 l/min y para el CaCl2 fue de 10,82 l/min con variación a 9,34 l/min momento en el cual el caudal empieza a decaer hasta hacerse cero por ineficiencia de la bomba a bajas temperaturas.



**Gráfico 22-4:** Caudal para la solución al 30% y válvula al 50% de apertura

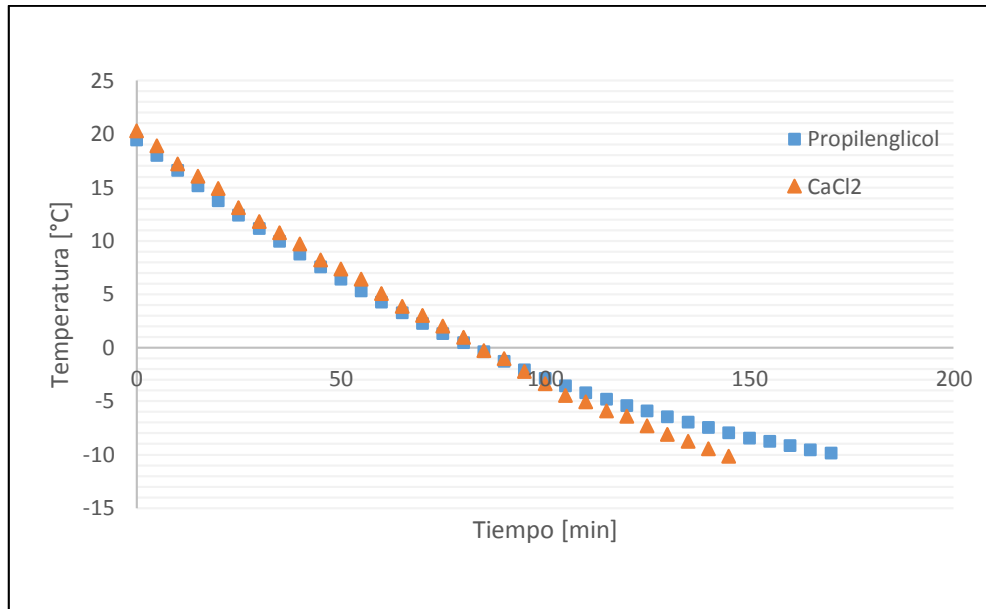
Realizado por: Autores

Al comparar los resultados de las dos estrangulaciones, en la estrangulación a 75% de la válvula existe una variación de 5 l/min en el caudal para la solución de CaCl<sub>2</sub> y para la solución de propilenglicol es de 3,19 l/min como podemos observar seguimos comprobando que mientras más aumenta la estrangulación de la válvula decrece más el caudal para ambas soluciones pero con mayor notoriedad para la solución de CaCl<sub>2</sub>.

A continuación se detalla la comparación para las dos soluciones con la concentración del 30 % y 50 % de apertura de la válvula en las cuales se observa que con CaCl<sub>2</sub> se alcanzó -10 °C en 145 minutos 15 minutos más que con la apertura de 75% y con el propilenglicol se llegó a obtener una temperatura de -10 °C en 170 minutos 10 minutos más que con la válvula al 75%, para ambas soluciones existió un aumento en el tiempo de enfriamiento al aumentar la estrangulación y la variación de temperatura casi tiene una tendencia lineal debido a la velocidad de enfriamiento propia de cada solución.

También podemos observar que durante los 100 minutos de prueba y de toma de datos existe una pequeña concordancia de valores en temperatura pasado los mismo empieza a variar por ende también varía la velocidad de enfriamiento.



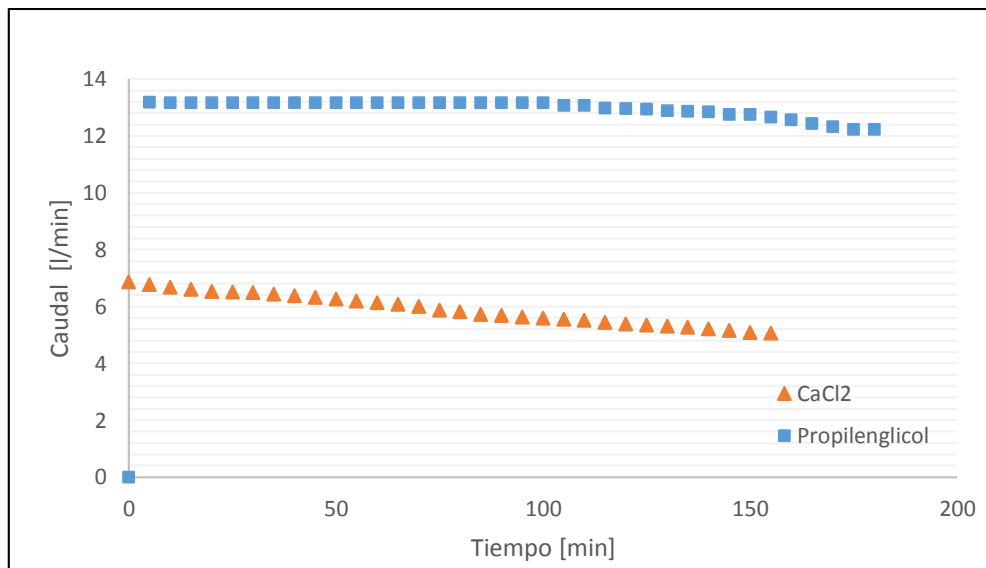


**Gráfico 23-4:** Temperatura para la solución al 30% y válvula al 50% de apertura

Realizado por: Autores

#### 4.4.4 *Análisis al 30% de concentración y 25% de apertura de la válvula.*

En la figura se puede apreciar el comportamiento del caudal para ambas soluciones variando la apertura de la válvula a 25% a la misma concentración de 30 % en el que el CaCl<sub>2</sub> varía desde 6,85 l/min a 5,06 l/min en y del propilenglicol la variación va desde 13,17 l/min a 12,22 l/min ahora podemos asegurar que a la composición que sea el caudal del CaCl<sub>2</sub> seguirá siendo menor en comparación a la solución de propilenglicol.

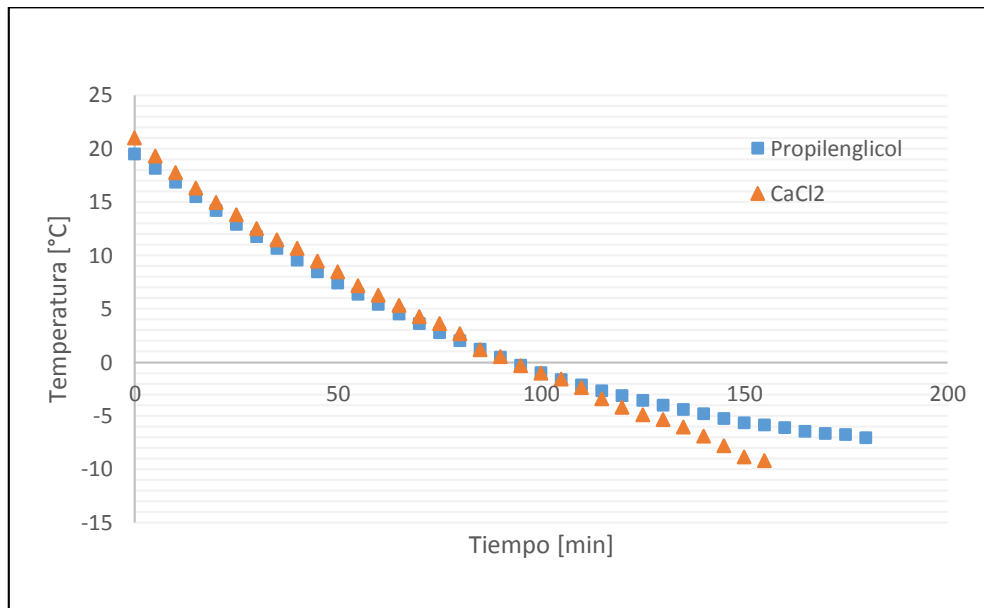


**Gráfico 24-4:** Caudal para la solución al 30% y válvula al 25%.de apertura

Realizado por: Autores

En la siguiente figura se ilustran las curvas de comportamiento de la temperatura en función al tiempo con la concentración del 30 % de ambas soluciones y 25 % de apertura de la válvula en las cuales se observa que con CaCl<sub>2</sub> se pudo alcanzar -9,19 °C en 155 minutos 10 minutos más que con la apertura de 50% y con el propilenglicol se llegó a obtener una temperatura de -7,058 °C en 180 minutos 10 minutos más que con la válvula al 50%, si lo comparamos con la concentración del 15 % y la del 21% vemos que con la concentración de 30% el tiempo aumenta para alcanzar la temperatura deseada.

Sigue existiendo una similitud de valores de temperatura durante los 120 minutos de la toma de datos para ambas soluciones. Una vez pasado los mismos empieza a variar por ende también varía la velocidad de enfriamiento.



**Gráfico 25-4:** Temperatura para la solución al 30% y válvula al 25% de apertura

Realizado por: Autores

#### 4.5 Análisis del consumo de energía para las dos soluciones

##### 4.5.1 Determinación de la potencia consumida por la unidad condensadora

Para ambos casos el equipo chiller utiliza un voltaje de 220 Voltios y una corriente de 10.1 A, que es la corriente en la línea de trabajo el mismo que se obtuvo mediante la medición con la utilización de una pinza amperimétrica.

$$P_A = V \cdot i \quad (28)$$

Dónde:

$P_A$ : Potencia Aparente [VA]

V: Voltaje [v]

i: Corriente [A]

$$P_A = 220 \text{ V} \times 10.1 \text{ A}$$

$$P_A = 2222 \text{ VA}$$

Para el cálculo del consumo de energía necesitamos la potencia real consumida por el equipo para conocer el costo que se debe pagar a la compañía de energía eléctrica, para ello utilizamos el factor de potencia que para el equipo chiller de 0,7 en estado crítico de funcionamiento ya que el equipo al no encontrarse trabajando a carga nominal es menos eficiente no es decir que la potencia real consumida por el equipo es el 70% de la potencia aparente.

$$P = P_A \cdot FP \quad (29)$$

Dónde:

P: Potencia real [W]

$P_A$ : Potencia Aparente [VA]

FP: Factor de potencia [-]

$$P_R = 2222 \times 0,7$$

$$P_R = 1555,4 \text{ Watts}$$

#### 4.5.2 Consumo de energía para la concentración de 15%.

Para el análisis de la solución de  $\text{CaCl}_2$  se utiliza los datos de la prueba con apertura de la válvula de esfera del 100%, en el que el tiempo de prueba fue de 80 minutos.

$$P_C = 1555,4 \text{ W} \times 80 \text{ m}$$

$$P_C = 1555,4 \text{ W} \times 1.33 \text{ h}$$

$$P_C = 2.074 \text{ KWh}$$

Este valor de energía consumida en el proceso de refrigeración en el equipo chiller se puede representar en sus equivalentes a continuación:

- Barril equivalente de petróleo: 0,00122 BOE

- Metro cubico normal de Gas Natural: 0,1914 m<sup>3</sup>gas
- Toneladas equivalentes de Carbón: 0,0002548 tce

Para el 15% de concentración de propilenglicol la prueba duro un tiempo de 105 minutos durante los cuales el equipo chiller permaneció encendido.

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 105 \text{ m}$$

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 1,75 \text{ h}$$

$$P_C = 2,722 \text{ kWh}$$

De manera análoga al caso anterior, este valor de energía consumida puede ser expresado en las siguientes equivalencias:

- Barril equivalente de petróleo: 0,001601 BOE
- Metro cubico normal de Gas Natural: 0,2513 m<sup>3</sup>gas
- Toneladas equivalentes de Carbón: 0,0003344 tc

Como se puede notar la energía consumida en la prueba con la solución de propilenglicol tiene una duración de 25 minutos adicionales, representando esto una diferencia de 0,64795 kWh de consumo de energía. Tomando en cuenta un costo de 0,09 dólares por cada kWh para el sector industrial de la región según ARCONEL, con estos datos se puede calcular el costo adicional que implica el cambio de refrigerante secundario por propilenglicol, considerando el caso más crítico con un funcionamiento diario del equipo solo hasta llegar a la temperatura mínima de la solución durante un año siendo este valor aproximadamente de 21 USD.

#### 4.5.3 Análisis del consumo de energía para la concentración de 21%

En este caso se realiza el análisis para la solución de CaCl<sub>2</sub> con una apertura de 100% de la válvula de esfera, la misma que se la realizo en un tiempo de 90 minutos.

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 90 \text{ m}$$

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 1,5 \text{ h}$$

$$P_C = 2,3331 \text{ kWh}$$

- Barril equivalente de petróleo: 0,001372 BOE
- Metro cubico normal de Gas Natural: 0,2154 m<sup>3</sup>gas

- Toneladas equivalentes de Carbón: 0,0002866 tce

Se puede observar que existe un aumento en cuanto a la prueba que analizamos con anterioridad del 15 % de concentración ya que existe un aumento en cuanto al tiempo de funcionamiento para alcanzar la temperatura deseada, aunque sigue siendo menor al de la energía consumida por la prueba de 15% de concentración de propilenglicol ya que el tiempo es mayor en comparación a esta prueba que fue de 90 minutos y en la de propilenglicol al 15 % fue de 105 minutos.

Para la prueba de 21% de concentración de propilenglicol el equipo paso encendido un tiempo de 120 minutos por ende va a ser mayor el consumo de energía como se muestra a continuación:

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 120 \text{ m}$$

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 2 \text{ h}$$

$$P_C = 3110,8 \text{ Wh}$$

$$P_C = 3,11 \text{ KWh}$$

Como mencionamos el aumento de energía es notorio al ser 120 minutos el tiempo de funcionamiento a continuación vamos a mostrar la equivalencia en cuanto a petróleo, gas y carbón del consumo de energía:

- Barril equivalente de petróleo: 0,00183 BOE
- Metro cubico normal de Gas Natural: 0,2871 m<sup>3</sup>gas
- Toneladas equivalentes de Carbón: 0,000382 tce

Como vemos es mayor la energía consumida en la prueba con la solución de propilenglicol en comparación a la de CaCl<sub>2</sub> ya que existe un aumento de 30 minutos dándonos una diferencia de 0,7769 kWh por lo cual existiría un ahorro en cuanto a energía consumida siendo en dólares americanos una cantidad de 25,2 en un año

#### 4.5.4 *Análisis del consumo de energía para la concentración de 30%.*

El consumo de energía para la concentración del 30% para las dos soluciones se realiza para el caso en que la válvula se encuentra abierta el 100%, para el caso de la solución de CaCl<sub>2</sub> donde el tiempo que tardo la prueba fue de 120 minutos.

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 120 \text{ m}$$

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 2 \text{ h}$$

$$P_C = 3,11 \text{ KWh}$$

- Barril equivalente de petróleo: 0,00183 BOE
- Metro cubico normal de Gas Natural: 0,2871 m<sup>3</sup>gas
- Toneladas equivalentes de Carbón: 0,000382 tce

Se puede observar que existe un aumento en el tiempo en que perdura la prueba en comparación con las pruebas analizadas anteriormente del 15 % y la de 21% de concentración. Para la prueba de 30% de concentración de propilenglicol el equipo permaneció encendido un tiempo de 155 minutos por ende va a ser mayor el consumo de energía como se muestra a continuación:

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 155 \text{ m}$$

$$P_C = 1555,4 \text{ W} * 2,583 \text{ h}$$

$$P_C = 4,018 \text{ KWh}$$

- Barril equivalente de petróleo: 0,002364 BOE
- Metro cubico normal de Gas Natural: 0,3709 m<sup>3</sup>gas
- Toneladas equivalentes de Carbón: 0,0004936 tce

Se puede observar que el consumo de energía para enfriar la solución de propilenglicol es mayor que en el caso de la solución de CaCl<sub>2</sub> por ende existe un aumento de aproximadamente 0,908 KWh, esta diferencia representa un gasto adicional en encender el equipo de 29,4 USD al año.

#### **4.6 Características generales de la solución de propilenglicol y de CaCl<sub>2</sub>.**

Luego de la revisión bibliográfica y observaciones durante la fase experimental de este proyecto se obtuvo la siguiente comparación de propiedades relevantes de la salmuera de propilenglicol y de la salmuera de cloruro de calcio con la finalidad de obtener criterios de análisis para su selección en aplicaciones de la industria local.

**Tabla 5-4:** Comparación general de las soluciones de propilenglicol y de CaCl<sub>2</sub>

Característica	Solución con mejor característica
Costo del anticongelante	CaCl <sub>2</sub> (menor costo)
Temperatura de congelación	CaCl <sub>2</sub> (menor temperatura)
Velocidad de enfriamiento	CaCl <sub>2</sub> (mayor velocidad)
Vida útil	Propilenglicol (aprox. 3 años) CaCl <sub>2</sub> (aprox. 2 años)
Color	Propilenglicol (incoloro) CaCl <sub>2</sub> (naranja)
Solubilidad	Propilenglicol (mezcla homogénea) CaCl <sub>2</sub> (sedimentación)
Corrosión en Acero Inoxidable	Propilenglicol (no corrosivo)
Restricciones para adquisición	Propilenglicol (ninguna)
Efecto antimicrobiano	Propilenglicol (evita proliferación de bacterias)

Realizado por: Autores

Mediante la tabla mostrada pueden analizarse características de los fluidos que no necesariamente están ligadas con la transferencia de calor pero que se pueden tomar en cuenta dependiendo de la aplicación para una correcta elección de un anticongelante para formar un fluido secundario, como es el caso de la corrosión en sistemas de acero inoxidable que para el caso de propilenglicol es compatible con este material (IGNATOWICZ, 2008, p. 69).

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

El desarrollo de un proyecto implica la búsqueda y análisis de información de fuentes relevantes en este caso esto permite definir cada elemento del equipo chiller y entender el proceso de refrigeración que se lleva en este, la bibliografía mostrada permite encuadrar criterios importantes para la elección de un refrigerante secundario para una aplicación específica, este conocimiento es requerido por los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica ya que la refrigeración es una muy importante área de estudio y de aplicación en la vida laboral.

Mediante la determinación del estado técnico del chiller se encontró pequeñas anomalías las mismas que no provocan un paro inminente del equipo como presencia de sedimentación, corrosión, desconexión del cableado, apertura incorrecta de válvulas, acumulación de impurezas en las superficies de la unidad condensadora y filtro del sistema de bombeo por nombrar algunos problemas, estas anomalías pueden ser evitadas con la realización de las tareas de mantenimiento planificadas, mediante esta evaluación sé que constató la importancia de que los equipos del laboratorio sea puestos en marcha constantemente, ya que su desuso da lugar a la degradación del equipo.

Las pruebas experimentales para cada concentración iniciaron con la apertura de la válvula al 25%, con esta apertura de válvula las pruebas se realizaron hasta llegar a temperaturas cercanas a la temperatura de congelación de la solución para cada concentración, en el desarrollo de estas pruebas se notó que la válvula al estar abierta solo el 25% provoca una gran caída de presión y que a medida que la salmuera se acerca a la temperatura de congelación existe un incremento excesivo de densidades lo que hace que sea más difícil impulsar el fluido provocando una disminución muy notable del caudal conllevando esto a una muy baja transferencia de calor, en esta situación el comportamiento de la unidad condensadora es similar como si el equipo se encontrara trabajando en vacío por lo que en el caso de la prueba al 15% se notó el inicio de congelamiento en el evaporador y al 30% de concentración hubo congelamiento tanto en la bomba como también en la tubería de baja presión.

Según se incrementa la concentración de la solución de propilenglicol como en la concentración de 30%, la misma tiende a tener un comportamiento muy cercano al comportamiento de la salmuera de  $\text{CaCl}_2$  a temperaturas por encima de los  $0^\circ\text{C}$ , mientras que luego que el enfriamiento pasa por este punto se produce una menor transferencia de calor, esta semejanza en el comportamiento puede justificarse debido a que a mayor concentración de la solución de  $\text{CaCl}_2$



como en el caso de análisis al 30% la misma presenta mayor dificultad para su impulsión con valor promedio del caudal de 21 l/min a diferencia de la solución de propilenglicol que su mezcla se mantiene homogénea y no existe la presencia de sedimentación y partículas que dificulten su circulación normal obteniéndose un valor aproximado de 27 l/min, por lo que las curvas de enfriamiento temperatura vs tiempo al iniciar la prueba tienen un comportamiento muy similar, de acuerdo al incremento de las pérdidas en el sistemas se produce una menor transferencia de calor, para el caso de la salmuera de  $\text{CaCl}_2$  existe una diferencia considerable del caudal al variar la apertura de la válvula, caso contrario al comportamiento de la solución de propilenglicol donde para aperturas de válvula de 50%, 75% y 100% la variación de caudal es menor.

De la comparación de las dos soluciones se determina que la solución de propilenglicol tarda mayor tiempo en enfriarse que la solución de cloruro de calcio, lo que en términos económicos representa un costo adicional de 29,4 USD/año para la concentración al 30% considerando únicamente el enfriamiento de la salmuera desde la temperatura ambiente hasta su punto de congelación, como se muestra en el presente documento esto además implica un mayor consumo de recursos no renovable como el petróleo y el gas.

La selección de un anticongelante para la formación de un refrigerante secundario requiere el análisis de varios criterios dependiendo de la aplicación, ya que en función de la necesidad se requerirá de ciertas propiedades especiales del fluido secundario, la comparación de una característica del fluido no es criterio suficiente para su selección definitiva, ya que en este trabajo los criterios utilizados para el estudio fueron el de no toxicidad y de mejor transferencia de calor lo que no pudo ser corroborado en su totalidad ya que la salmuera de cloruro de calcio presenta mejores características para un enfriamiento rápido.

## **5.2 Recomendaciones**

Antes de poner en marcha el equipo se debe realizar obligatoriamente una inspección del equipo verificando el nivel de aceite, nivel de refrigerante, estado de las conexiones eléctricas, voltajes disponibles en las tomas, y que el área de trabajo de los equipos se encuentren completamente limpias y sin objetos que puedan producir un funcionamiento defectuoso en el equipo de manera especial en la unidad condensadora la misma que necesita de gran espacio para que se asegure un flujo de aire libre que permita realizar a función requerida.

Se debe cumplir con las tareas dispuestas en el plan de mantenimiento del equipo considerando la frecuencia con la que estas deben ser realizadas, ya que solo de esta manera se podrá asegurar

la vida útil del equipo y que se pueda continuar con estudios referentes a esta área de la ingeniería mecánica.

Debido a que el equipo pertenece al laboratorio de transferencia de calor se deben planificar actividades en las que se haga funcionar el equipo constantemente, esto con la finalidad evitar el deterioro del equipo y principalmente que los estudiantes puedan comprender y reforzar los conocimientos adquiridos en las aulas en cátedras relacionadas con la energía, mantenimiento e instrumentación, lo cual ayuda a los futuros profesionales a desenvolverse de una mejor manera en su vida laboral ya que el chiller es un equipo que tiene varias aplicaciones industriales.

Se recomienda continuar con la investigación con la finalidad de que los estudiantes puedan incrementar los conocimientos en área de la refrigeración, conocimientos que además ayudan en el desarrollo de proyectos industriales en el área local mediante una mejor toma de decisiones al seleccionar un anticongelante.

Para el caso en que se requiera investigar el comportamiento de fluidos secundarios a temperaturas menores a los  $-10^{\circ}\text{C}$  se recomienda proceder a cambiar la bomba por una de mayor potencia, la misma que permita bombear fluido a muy baja temperatura lo que es utilizada en varias de las aplicaciones industriales.

## BIBLIOGRAFÍA

**ASHRAE.** *Fundamentals*. Atlanta-EE.UU: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2009. pp. 775-778.

**ASHRAE.** *Handbook - Refrigeration*. Atlanta- EE.UU: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2010. pp. 46-66.

**CALLEN HERBERT, B.** *Introducción a las teorías físicas de la termostática del equilibrio y de la termodinámica irreversible*. Madrid-España: AC, libros científicos y técnicos, 1985. p. 16.

**CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY.** *Manual de Aire Acondicionado*. Barcelona-España: Marcombo, 1980. pp 389-392.

**ÇENGEL, Yunus A.** *Transferencia de calor y masa*. 3ª ed. México: McGraw-Hill InterAmericana, 2007. pp. 2-62.

**COPELAND.** *Refrigeration System Components*. Copeland Refrigeration Manual. Sidney-EE.UU: Emerson Climate Technologies, 1967, pp. 1-3.

**DÍAZ BONIFÁZ, Rodrigo.** *Sistemas Térmicos*. Riobamba-Ecuador: Ecocopycenter, 2011. p. 175.

**DOSSAT, Roy J.** *Principios de Refrigeración*. México: CECOSA, 1986. pp. 109-315.

**FRANCO LIJÓ, Juan Manuel.** *Manual de Refrigeración*. Barcelona-España: Reverte, 2006. pp. 1-185.

**FUNDACION RED DE ENERGÍA BUN-CA.** *Manual Técnico Refrigeración Comercial*. San José-Costa Rica: Diseño Editorial S.A, 2011. pp. 3-37.

**IGNATOWICZ, Monika.** *Corrosion aspects in indirect systems with secondary refrigerants* [en línea] (Trabajo de titulación). (Maestría). KTH School of Industrial Engineering and Management Division of Applied Thermodynamic and Refrigeration, Stockholm, Sweden:

2008. p. 69. [Consulta: 2017-06-20]. Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A483528&dswid=-8766>

**KISHORE, Nadkarni R.** *Guide to ASTM Test Methods for the Analysis of Petroleum Products and Lubricants. Segunda.* West Conshohocken-EE.UU: ASTM International, 2007. pp. 273-274.

**LAURENCIO, Hector & DELGADO, Yodelkis.** “Influencia de la Temperatura en las Propiedades Reológicas de la Emulsión de Petróleo Pesado”. *Minería y Geología* [En línea], 2008, (Cuba) 24(2), pp. 1-12 [Consulta: 2017-07-20]. ISSN 1993 8012, Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/2235/223515951004.pdf>

**MACAS, José & TOAINGA, Esteban.** 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). (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador, 2015. pp. 83-112. [Consulta: 2017-06-20]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4653>

**MELINDER, Å.** “Properties and Other Aspects of Aqueous Solutions Used for Single Phase and Ice Slurry Applications” *International journal of refrigeration* [En línea], 2010, (Sweden) 33(8), pp. 1506-1512. [Consulta: 2017-07-10]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014070071000160X>

**MELINDER, Å.** “Update on Secondary Refrigerants for Indirect Systems” *Proceedings of IEA Annex 26 Meeting* [En línea], 2000, 2, pp. 1-2. [Consulta: 2017-06-27]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/A\\_Melinder/publication/237462358\\_UPDATE\\_ON\\_SECONDARY\\_REFRIGERANTS\\_FOR\\_INDIRECT\\_SYSTEMS/links/54dc855c0cf23fe133b1b48f.pdf](https://www.researchgate.net/profile/A_Melinder/publication/237462358_UPDATE_ON_SECONDARY_REFRIGERANTS_FOR_INDIRECT_SYSTEMS/links/54dc855c0cf23fe133b1b48f.pdf)

**MOTT, Robert L.** *Mecánica de Fluidos Aplicada.* 4ª ed. México: Pearson, 2006. pp. 12-146.

**MÜLLER, Erich.** *Termodinámica Básica.* 2ª ed. Caracas-Colombia: Consultora Kemiteknik C.A., 2002. pp. 121-124.

**NEELIMA J, Kale & LOYD V, Allen Jr.** “Studies on Microemulsions Using Brij 96 as Surfactant and Glycerin, Ethylene Glycol and Propylene Glycol as Cosurfactants” *International journal of pharmaceutics* [En línea], 1989, (EE:UU) 57(2), pp. 87-93. [Consulta: 2017-07-11]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378517389902962>

**PRABHAKARAN, M; et al.** “Development and Assessment of Ceria-Propylene Glycol Nanofluid as an Alternative to Propylene Glycol for Cooling Applications” *Applied Thermal Engineering* [En línea], 2016, (India) 102, pp. 329-335. [Consulta: 2017-07-15]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116304689>

**RODRIGUEZ, Jorge A.** *Introduccion a la Termodinamica con Algunas Aplicaciones de Ingeniería*. Mexico DF-Mexico: Universidad Tecnologica Nacional, 1990. p. 429.

**SATTI, Jagannadha; et al.** “Investigation of the Thermal Conductivity of Propylene Glycol Nanofluids and Comparison with Correlations” *International Journal of Heat and Mass Transfer* [En línea], 2016, (EE.UU) 107, pp. 1-11. [Consulta: 2017-06-23]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931016320063>

**STOECKER, Wilbert F.** *Industrial Refrigeration Handbook*. New York-EE.UU: McGraw-Hill, 1998. pp. 112-664.

**WANG, Shan K.** *Handbook of Air Conditional and Refrigeration*. 2ª ed. New York-EE.UU: McGraw-Hill, 2000. pp. 403-462.

**WEXLER, Philip.** *Encyclopedia of Toxicology*. London-UK: Elsevier, 2014. pp. 2.525, 3.1113.