



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“REPOTENCIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DEL CHILLER DEL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR, PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE ENFRIAMIENTO”

**MACAS SARABIA JOSÉ STALIN
TOANGA MOLINA ESTEBAN EDUARDO**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

**RIOBAMBA – ECUADOR
2015**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2015-01-20

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**MACAS SARABIA JOSÉ STALIN
TOAINGA MOLINA ESTEBAN EDUARDO**

Titulada:

**“REPOTENCIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DEL CHILLER DEL LABORATORIO
DE TRANSFERENCIA DE CALOR, PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS
DE ENFRIAMIENTO”**

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. Ángel Jácome Domínguez
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Telmo Moreno Romero
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: MACAS SARABIA JOSÉ STALIN

TÍTULO DE LA TESIS: “REPOTENCIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DEL CHILLER DEL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR, PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE ENFRIAMIENTO”

Fecha de Examinación: 2015-12-18

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Viteri Núñez PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Ángel Jácome Domínguez DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Telmo Moreno Romero ASESOR			

* 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. Edwin Viteri Núñez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: TOAINGA MOLINA ESTEBAN EDUARDO

TÍTULO DE LA TESIS: “REPOTENCIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DEL CHILLER DEL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR, PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE ENFRIAMIENTO”

Fecha de Examinación: 2015-12-18

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Edwin Viteri Núñez PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Ángel Jácome Domínguez DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Telmo Moreno Romero ASESOR			

* 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. Edwin Viteri Núñez
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.

Toaingna Molina Esteban Eduardo

Macas Sarabia José Stalin

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Nosotros, José Stalin Macas Sarabia y Esteban Eduardo Toaingá Molina, 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.

Macas Sarabia José Stalin

Cedula de Identidad: 060397094-8

Toaingá Molina Esteban Eduardo

Cedula de Identidad: 210021599-1

DEDICATORIA

La presente tesis la dedico a mi familia, en especial mis padres Marco y Dorita, que me supieron brindar todo el apoyo necesario para poder culminar mi carrera y a mi hermano Raúl Benjamín, que siempre me ha apoyado a lo largo de mi vida.

Esteban Eduardo Toaingá Molina

A mis padres: Segundo Macas y Delia Sarabia a quienes dedico el presente trabajo, por el cariño, dedicación y entrega para con todos sus hijos.

José Stalin Macas Sarabia

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a Dios, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos la oportunidad de obtener una profesión y ser personas útiles a la sociedad. Al Ing. Ángel Jácome Director de tesis y al Ing. Telmo Moreno, por brindar su guía y asesoramiento para poder realizar el presente trabajo. También a todos los amigos, compañeros y personas que nos apoyaron de una u otra manera para culminar con éxito una etapa de nuestras vidas.

Esteban Eduardo Toaingá Molina

Agradezco a mis padres, hermanos, amigos, docentes y personal administrativo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su apoyo constante para la exitosa culminación de la carrera.

José Stalin Macas Sarabia

CONTENIDO

Pág.

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Justificación	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	<i>Objetivo general</i>	2
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	3
2.	MARCO TEÓRICO	
2.1	Teoría de refrigeración	4
2.1.1	<i>Calor</i>	4
2.1.2	<i>Calor sensible</i>	5
2.1.3	<i>Calor latente</i>	5
2.1.3.1	<i>Calor latente de fusión</i>	5
2.1.3.2	<i>Calor latente de evaporación</i>	6
2.1.4	<i>Refrigerantes</i>	6
2.1.4.1	<i>Clases de refrigerantes</i>	6
2.1.5	<i>Sistema de refrigeración</i>	7
2.1.6	<i>Refrigeración por compresión de vapor.</i>	7
2.2	Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	8
2.2.1	<i>Proceso de compresión</i>	9
2.2.2	<i>Proceso de condensación</i>	9
2.2.3	<i>Proceso de expansión</i>	9
2.2.4	<i>Proceso de evaporación</i>	9
2.3	Fundamentos de análisis para equipos de refrigeración	10
2.3.1	<i>Unidades de capacidad</i>	10
2.3.2	<i>Efecto de refrigeración</i>	10
2.3.3	<i>Flujo del refrigerante en circulación</i>	12
2.3.4	<i>Coeficiente de rendimiento</i>	13
2.3.5	<i>Análisis del efecto de presión en la succión</i>	13
2.3.6	<i>Análisis del efecto de presión en la descarga</i>	13
2.4	Chiller.....	13
2.5	Componentes importantes del sistema de refrigeración chiller	14
2.5.1	<i>Compresor hermético</i>	14
2.5.2	<i>Evaporador de placas</i>	14
2.5.3	<i>Válvula de expansión</i>	15
2.5.4	<i>Carga de refrigerante</i>	16
2.5.5	<i>Efecto de carga de refrigerante en el evaporador</i>	16
2.6	Formas de transferencia de calor	16
2.6.1	<i>La conducción térmica</i>	16
2.7	Anticongelantes para refrigeración industrial	17
2.7.1	<i>Anticongelantes con base cloruro</i>	17
2.7.1.1	<i>Temperatura al disolver</i>	18
2.8	Pérdidas de energía hidráulica	20
2.8.1	<i>Pérdidas primarias</i>	20
2.8.2	<i>Pérdidas secundarias</i>	21
2.9	Altura útil efectiva	21
2.9.1	<i>Columna dinámica de succión</i>	22

3.	ESTUDIO DE LA CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN Y MONTAJE DE INSTRUMENTOS	
3.1	Identificación del problema	23
3.2	Alternativas de solución	23
3.2.1	<i>Desarrollo del lenguaje de programación</i>	23
3.2.2	<i>Tarjetas de procesamiento de señales NI-myDAQ</i>	24
3.2.2.1	<i>Tarjeta arduino</i>	25
3.2.3	<i>Control para la adquisición del flujo másico del cloruro de calcio</i>	26
3.2.3.1	<i>Flujómetros tipo paleta</i>	26
3.2.3.2	<i>Flujómetros tipo turbina</i>	28
3.2.3.3	<i>Flujómetro de ultrasonido</i>	28
3.2.4	<i>Control para la adquisición de temperatura</i>	29
3.2.4.1	<i>Sensores de temperatura</i>	29
3.2.4.2	<i>Sensor de temperatura RTD</i>	29
3.2.4.3	<i>Termopares</i>	30
3.2.4.4	<i>Termistores</i>	31
3.2.4.5	<i>Termistor NTC</i>	31
3.2.5	<i>Control para modificar el caudal de descarga del cloruro de calcio</i>	32
3.2.5.1	<i>Servomotor</i>	32
3.2.5.2	<i>Electroválvula</i>	33
3.2.5.3	<i>Variador de frecuencia</i>	33
3.3	Selección de la mejor alternativa para la adquisición de señales	33
3.4	Acondicionamiento de señales	35
3.4.1	<i>Acondicionamiento de señal para sensor de temperatura NTC</i>	35
3.4.2	<i>Acondicionamiento de señal para sensor de flujo</i>	37
3.4.3	<i>Acondicionamiento para el mando automatizado</i>	40
3.4.4	<i>Diseño de la tarjeta PCB</i>	42
3.5	Fuente de alimentación DC	42
3.6	Evaluación del estado actual del chiller	44
3.6.1	<i>Pruebas iniciales del chiller</i>	44
3.6.1.1	<i>Registro de la toma de datos experimentales para la evaluación inicial</i>	44
3.6.2	<i>Evaluación del estado de carga de refrigerante</i>	47
3.6.3	<i>Análisis y evaluación de resultados después de la carga</i>	48
3.6.4	<i>Evaluación final</i>	48
3.7	Montaje de equipos e instrumentos	51
3.7.1	<i>Montaje del sensor de temperatura</i>	52
3.7.2	<i>Montaje del sensor de flujo</i>	53
3.7.3	<i>Posición del montaje del sensor de flujo</i>	54
3.7.4	<i>Instalación del sensor de flujo</i>	55
3.7.5	<i>Montaje del servomotor</i>	55
3.7.6	<i>Montaje del hardware NI myDAQ</i>	56
3.7.7	<i>Programa LabView</i>	57
3.7.8	<i>Instrumentación virtual</i>	58
3.7.9	<i>Descripción del panel frontal</i>	58
3.7.10	<i>Configuración del DAQ assistant para la adquisición de datos</i>	59
3.7.11	<i>Generación de reportes</i>	60
3.8	Manuales	64
3.8.1	<i>Finalidad de la normativa</i>	64
3.8.2	<i>Objetivos del mantenimiento</i>	64
3.8.3	<i>Nomenclatura</i>	64
3.8.4	<i>Generalidades</i>	65
3.9	Manual de mantenimiento	65
3.9.1	<i>Previsiones para tareas de mantenimiento</i>	66
3.9.2	<i>Tareas de mantenimiento</i>	69
3.9.3	<i>Manual de operaciones</i>	70

3.10	Manual de seguridad.....	72
3.10.1	<i>Seguridad al momento de adquirir datos en en chiller</i>	73
4.	FASE EXPERIMENTAL DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS	
4.1	Cálculo para densidad de cloruro de calcio por el método del picnómetro. .	75
4.2	Cambio de la concentración de cloruro de calcio	77
4.3	Análisis del cambio funcional del equipo	78
4.3.1	<i>Cambio del punto de operación del equipo por estrangulación</i>	78
4.4	Realización de pruebas.....	81
4.4.1	<i>Análisis de la sensibilidad en la toma de datos experimentales</i>	81
4.4.2	<i>Experimentación para concentración del 21% de CaCl₂</i>	82
4.4.3	<i>Prueba N° 1 estrangulación de la válvula al 25% (21% CaCl₂)</i>	83
4.4.4	<i>Prueba N° 2 estrangulación de la válvula al 50% (21% CaCl₂)</i>	85
4.4.5	<i>Prueba N° 3 para estrangulación de la válvula al 75% (21% CaCl₂)</i>	86
4.4.6	<i>Prueba N° 4 para estrangulación de la válvula al 100% (21% CaCl₂)</i>	88
4.4.7	<i>Resultados de las pruebas para concentración del 21% CaCl₂</i>	90
4.4.8	<i>Análisis de las regiones en las curvas de enfriamiento (21% CaCl₂)</i>	91
4.4.9	<i>Análisis de la variación de caudal en las curvas (21% CaCl₂)</i>	94
4.4.10	<i>Experimentación para concentración del 30% de CaCl₂</i>	95
4.4.11	<i>Prueba N° 5 estrangulación de la válvula al 25% (30% CaCl₂)</i>	95
4.4.12	<i>Prueba N° 6 para estrangulación de la válvula al 50% (30% CaCl₂)</i>	97
4.4.13	<i>Prueba N° 7 para estrangulación de la válvula al 75% (30% CaCl₂)</i>	99
4.4.14	<i>Prueba N° 8 para estrangulación de la válvula al 100% (30% CaCl₂)</i>	101
4.4.15	<i>Resultados de las pruebas para concentración del 30% CaCl₂</i>	103
4.4.16	<i>Análisis de las regiones en las curvas de enfriamiento (30% CaCl₂)</i>	104
4.4.17	<i>Análisis de la variación de caudal en las curvas de enfriamiento (30% CaCl₂)</i>	105
4.4.18	<i>Experimentación para concentración del 15% de CaCl₂</i>	106
4.4.19	<i>Prueba N° 9 para estrangulación de la válvula al 25% (15% CaCl₂)</i>	106
4.4.20	<i>Prueba N° 10 para estrangulación de la válvula al 50% (15% CaCl₂)</i>	108
4.4.21	<i>Prueba N° 11 para estrangulación de la válvula al 75% (15% CaCl₂)</i>	110
4.4.22	<i>Prueba N° 12 para estrangulación de la válvula al 100% (15% CaCl₂)</i>	112
4.4.23	<i>Resultados de las pruebas para concentración del 15% CaCl₂</i>	114
4.4.24	<i>Análisis de las regiones en las curvas de enfriamiento</i>	114
4.4.25	<i>Análisis de la variación de caudal en las curvas de enfriamiento (15% CaCl₂)</i>	115
4.5	Análisis final del comportamiento por concentración	116
4.5.1	<i>Análisis de la variación de velocidad de enfriamiento por concentración</i>	117
4.6	Guías de laboratorio	122
5.	ANÁLISIS DE COSTOS	
5.1	Descripción del análisis de costos	123
5.2	Costos directos	123
5.2.1	<i>Costo de materiales y accesorios</i>	123
5.2.2	<i>Costos de maquinarias y equipos utilizados</i>	124
5.2.3	<i>Costos de mano de obra</i>	125
5.2.4	<i>Costo de envíos y transporte</i>	125
5.2.5	<i>Total de costos directos</i>	125
5.3	Costos indirectos	126
5.4	Costos totales.....	126
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1	Conclusiones	127
6.2	Recomendaciones.....	128

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

LISTA DE TABLAS

Pág.

1	Refrigerantes que tenderán a sustituir a los contaminantes.....	7
2	Resumen de propiedades del refrigerante R404.....	11
3	Metales usados para los RTDs.....	30
4	Especificaciones del servomotor.....	33
5	Especificaciones para selección del sensor de flujo.....	34
6	Especificaciones para selección del sensor de temperatura.....	34
7	Especificaciones para selección del actuador del control de caudal.....	34
8	Resumen de la toma de datos.....	45
9	Velocidades de enfriamiento respecto a las pruebas 1 y 2.....	47
10	Mediciones de corriente iniciales.....	47
11	Medición de corrientes finales.....	48
12	Presiones de alta y baja del equipo chiller.....	48
13	Tareas de mantenimiento para el chiller.....	70
14	Descripción de elementos del equipo.....	71
15	Resumen de datos para el cálculo de densidad.....	75
16	Pérdidas de carga por fricción en accesorios para la adquisición.....	79
17	Resumen de cálculo de pérdidas para 25% de estrangulación.....	80
18	Resumen de cálculo de pérdidas para 50% de estrangulación.....	80
19	Resumen de cálculo de pérdidas para 75% de estrangulación.....	80
20	Resumen de cálculo de pérdidas para 100% de estrangulación.....	80
21	Eficiencia de la bomba a diferentes aperturas.....	81
22	Prueba de sensibilidad de datos.....	82
23	Datos prueba N° 1 (21% CaCl ₂).....	83
24	Datos prueba N° 2 (21% CaCl ₂).....	85
25	Datos prueba N° 3 (21% CaCl ₂).....	87
26	Datos prueba N° 4 (21% CaCl ₂).....	89
27	Resultados de pruebas al 21% CaCl ₂	90
28	Velocidades de enfriamiento por regiones 21% CaCl ₂	92
29	Datos prueba N° 5 (30% CaCl ₂).....	96
30	Datos prueba N° 6 (30% CaCl ₂).....	98
31	Datos prueba N° 7 (30% CaCl ₂).....	100
32	Datos prueba N° 8 (30% CaCl ₂).....	102
33	Resultados de pruebas al 30% CaCl ₂	103
34	Velocidades de enfriamiento por regiones 30% CaCl ₂	105
35	Datos prueba N° 9 (15% CaCl ₂).....	107
36	Datos prueba N° 10 (15% CaCl ₂).....	109
37	Datos prueba N° 11 (15% CaCl ₂).....	111
38	Datos prueba N° 12 (15% CaCl ₂).....	112
39	Resultados de pruebas al 15% CaCl ₂	114
40	Velocidades de enfriamiento por regiones 15% CaCl ₂	115
41	Tabla de datos experimentales por concentración.....	117
42	Tabla resumen para cálculo de flujo de calor (15% CaCl ₂).....	118
43	Tabla resumen para cálculo de flujo de calor (21% CaCl ₂).....	119

44	Tabla resumen para cálculo de flujo de calor (30% CaCl ₂).....	120
45	Costo de materiales eléctricos y electrónicos.....	123
46	Costos de materiales para instalaciones hidráulicas.....	124
47	Total de costos de materiales y accesorio.....	124
48	Costos de maquinarias y equipos	125
49	Costo mano de obra	125
50	Costo de envíos y transporte	125
51	Total de costos directos.....	125
52	Costos indirectos.	126
53	Costos totales	126

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1	Ciclo básico de compresión de vapor 8
2	Proceso real - Diagrama presión-entalpía 9
3	Esquema general de un chiller 13
4	Evaporador de placas..... 14
5	Vista de corte de una válvula de expansión termostática 15
6	Ubicación de un bulbo térmico en un sistema de refrigeración..... 15
7	Diagrama de fases para cloruro de calcio a diferentes concentraciones..... 18
8	Incremento de temperatura al diluir cloruro de calcio en agua. 18
9	Calor específico de soluciones acuosas de CaCl_2 19
10	Viscosidad absoluta de soluciones de cloruro de calcio 19
11	Densidad de soluciones de cloruro de calcio. 20
12	Representación de cabeza estática de succión. 22
13	Sistema de adquisición de datos 24
14	Tarjeta de adquisición NI myDAQ..... 25
15	Tarjeta Arduino 26
16	Sensor tipo paleta..... 27
17	Sensor de flujo GF-515 27
18	Sensor tipo turbina 28
19	Principio del flujómetro de ultrasonido 28
20	Forma constructiva de un RTD 30
21	Estructura de un termopar..... 31
22	Termistor NTC 32
23	Servomotor DC 32
24	Esquema de adquisición de datos 35
25	Curva característica de la NTC para los diferentes valores de resistencia 36
26	Circuito de acondicionamiento para la NTC 37
27	Circuito para la conversión de onda senoidal del sensor de flujo 38
28	Circuito de acondicionamiento del sensor de flujo 39
29	Circuito de control para el accionamiento del sistema 40
30	Circuito de potencia de la línea monofásica 40
31	Circuito de potencia de la línea trifásica 41
32	Diseño de circuito de control de señales 41
33	Vista superior de la PCB 42
34	Ruteo de tarjeta de acondicionamiento 42
35	Elementos de una fuente de alimentación..... 43
36	Fuente de 12 V y 5 A..... 43
37	Chiller antes de la repotenciación 44
38	Gráfica temperatura vs tiempo del estado del chiller 46
39	Medición de corriente al arranque..... 47
40	Carga de refrigerante 48
41	Gráfica presión vs tiempo del estado del chiller 49
42	Diagrama presión-entalpía R-404A..... 50
43	Tubería en bypass..... 52

44	Termistor NTC	52
45	Tarjeta de circuito impreso	53
46	Requisitos recomendados para montaje del sensor.....	53
47	Posiciones de instalación del sensor de caudal.	54
48	Alineación del sensor con dirección del flujo	55
49	Montaje de sensor de flujo	55
50	Bastidor del servomotor.....	56
51	Montaje de servomotor.....	56
52	Tablero de control.....	56
53	Montaje de NI myDAQ.....	57
54	Panel frontal del chiller	59
55	Configuración de DAQ assistant	60
56	Configuración de las entradas.....	60
57	El bloque de programación de reportes	61
58	Diagrama de flujo de programación	62
59	Diagrama de flujo de programación continuación	63
60	Descripción del equipo	71
61	Descripción del equipo	76
62	Arreglo de la instalación hidráulica para la adquisición.....	79
63	Pruebas de sensibilidad de datos experimentales	82
64	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 1 (21% CaCl ₂).....	84
65	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 2 (21% CaCl ₂).....	86
66	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 3 (21% CaCl ₂).....	88
67	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 4 (21% CaCl ₂).....	90
68	Curvas de enfriamiento para concentración del 21% CaCl ₂	91
69	Tendencia de la velocidad de enfriamiento (21% CaCl ₂)	92
70	Congelamiento inicial del intercambiador de calor	93
71	Congelamiento del intercambiador de calor	93
72	Curvas de variación de caudal para concentración del 21% CaCl ₂	94
73	Curvas de variación de caudal en función de temperatura (21% CaCl ₂).....	94
74	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 5 (30% CaCl ₂).....	96
75	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 6 (30% CaCl ₂).....	99
76	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 7 (30% CaCl ₂).....	101
77	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 8 (30% CaCl ₂).....	103
78	Curvas de enfriamiento para concentración del 30% CaCl ₂	104
79	Tendencia de la velocidad de enfriamiento (30% CaCl ₂)	105
80	Curvas de variación de caudal para concentración del 30% CaCl ₂	106
81	Curvas de variación de caudal en función de temperatura (30% CaCl ₂).....	106
82	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 9 (15% CaCl ₂).....	108
83	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 10 (15% CaCl ₂).....	110
84	Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 11 (15% CaCl ₂).....	111
85	Curva temperatura vs tiempo prueba N° 12 (15% CaCl ₂)	113
86	Curvas de enfriamiento para concentración del 15% CaCl ₂	114
87	Tendencia de la velocidad de enfriamiento (15% CaCl ₂)	115
88	Curvas de variación de caudal para concentración del 15% CaCl ₂	116
89	Curvas de variación de caudal en función de temperatura (15% CaCl ₂).....	116
90	Curvas de temperatura en función de concentración de CaCl ₂	118
91	Tendencia del flujo de calor para una concentración de 15%CaCl ₂	121

92	Tendencia del flujo de calor para una concentración de 21%CaCl ₂	121
93	Tendencia del flujo de calor para una concentración de 30%CaCl ₂	122

LISTA DE ABREVIACIONES

AISI	American Iron and Steel Institute
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASME	American Society Mechanical Engineer
ISO	International Society Organization
BTU	British Thermal Unit
NTC	Negative Temperature Coefficient
HMI	Human Manager Interfaz
COP	Coefficient Operating Process

SIMBOLOGÍA

COP	Coeficiente de rendimiento térmico	
C_p	Calor específico a presión constante	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$
d_h	Diámetro hidráulico	m
ER	Efecto de refrigeración	kJ/kg
G	Ganancia de un sistema de control	m/s^2
G	Aceleración de la gravedad	m/s^2
H	Pérdidas de carga	mca
h	Entalpía	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
k	Conductibilidad térmica	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
L	Longitud	m
P	Presión	Pa
Q	Caudal	m^3/s
q	Flujo de calor	kJ
R	Resistencia eléctrica	Ω
RC	Relación de compresión	
Re	Número de Reynolds	
T, t	Temperatura	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$
TR	Toneladas de refrigeración	BTU/h
V	Volumen	L
v	Velocidad	m/s
β	Constante característica de una NTC	
λ	Coeficiente de fricción	
ρ	Densidad de fluido	kg/m^3
μ	Viscosidad cinemática	m^2/s
ν	Viscosidad absoluta	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
η	Eficiencia	

LISTA DE ANEXOS

- A** Factores corrección K pulsos por unidad de líquido
- B** Bloque de programación completo del sistema
- C** Corrección de densidad por temperatura
- D** Equivalencia para la determinación de la concentración de CaCl_2
- E** Gravedad específica solución CaCl_2
- F** Factores k de pérdida de carga
- G** Viscosidad dinámica del cloruro de calcio
- H** Puntos de operación de la bomba a diferente caudal
- I** Diagrama de densidad del cloruro de calcio a diferentes concentraciones
- J** Diagrama de calor específico del cloruro de calcio a diferentes concentraciones
- K** Fichas técnicas del manual de mantenimiento
- L** Tabla de historial de averías
- M** Repuestos utilizados en reparaciones
- N** Tabla de posibles fallas o ajustes de la programación
- O** Guía de laboratorio

RESUMEN

El presente trabajo de grado trata de la repotenciación y análisis de datos de un equipo de refrigeración chiller. El interés científico del desarrollo de esta investigación se basa en la importancia de ampliar conocimientos acerca de la funcionalidad de este tipo de equipos al variar las condiciones de servicio para las que fue diseñado, contribuyendo con información valiosa que debe tomarse en cuenta para el desarrollo industrial de los mismos.

En el análisis para la extracción de calor de un volumen de 218 l de solución compuesta a base cloruro de calcio CaCl_2 en concentraciones experimentales de 15%, 21% y 30% de composición en masa determina que la mayor dificultad es el aumento de la resistencia en flujo másico con variaciones estimadas en pérdidas de presión que desembocan en el cambio de los puntos de operación del equipo de bombeo para la recirculación de la salmuera, además, la variación del calor específico por temperatura involucra una mayor entrega de energía por parte de la unidad condensadora.

Para la adquisición se desarrolla una interfaz de usuario HMI en el software LabVIEW, la misma que procesa datos de variaciones de caudal y temperatura. La comparativa de datos experimentales arroja curvas de tendencia no lineal que alargan el tiempo de enfriamiento según la concentración molar de la salmuera, con el propósito de analizar temperaturas hasta los $-10\text{ }^\circ\text{C}$ el equipo tiene una ejecución funcional óptima recomendándose un cambio de la unidad de bombeo e intercambiador de calor para aumentar el campo de análisis de datos.

ABSTRACT

This paper is about the empowerment and data analysis of chiller refrigeration equipment. The scientific interest for this research development is based on the importance of expanding knowledge about functionality of this type of equipment to vary service conditions for which it was designed, contributing valuable information to be taken into account for industrial development.

In the analysis for heat extraction in a volume of 218 l solution composed of calcium chloride CaCl_2 in experimental concentrations of 15%, 21% and 30% mass composition determines that the greatest difficulty is mass flow with variations estimated in pressure losses which lead to the change of operating points in the pumping equipment for the brine recirculating, also, the specific heat variation for temperature involves greater energy delivery by the condensing unit.

For the acquisition user interface HMI software in LabVIEW is developed, which processes data of temperature and flow variations. The comparison of experimental data provides nonlinear trend curves which extend the cooling time according to the molar concentration of the brine, in order to analyze temperatures up to $-10\text{ }^\circ\text{C}$, the equipment has an optimal functional performance, a change of the pumping unit and heat exchanger to increase the data analysis field is recommended.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La absorción térmica es un fenómeno que es aprovechado en gran parte por las máquinas cuyo principio es la transferencia de calor, siendo la refrigeración no más que el transporte de energía o calor de un refrigerante a una sustancia a refrigerar, tenemos que el uso de este principio viene de épocas bastante anteriores a las que utilizan una aportación de trabajo mecánico en compresión de líquidos refrigerantes.

Equipos refrigeradores, unidades condensadoras, chillers, manejadoras de aire, entre otros, utilizan refrigerantes de distintos tipos para conseguir la absorción térmica de los recintos para los que son adecuados. Estos refrigerantes han ido evolucionando obteniendo mejores características de composición proponiendo el menor impacto ambiental sobre todo los que utilizan una base en cloro para su fabricación, evitando el deterioro de la capa de ozono.

En el caso específico del chiller se utiliza dos refrigerantes, siendo el principal aquel que utiliza la unidad condensadora para disminuir la temperatura del mismo a través de la compresión mecánica, esta energía térmica es transmitida a un refrigerante secundario por medio del intercambiador de calor. La energía cedida requiere que las propiedades de estos refrigerantes secundarios lleguen a temperaturas muy por debajo del punto de congelación del agua, usándose mezclas en base glicol y otras sales diferentes. El cloruro de calcio disuelto en agua mejor conocido como salmuera es uno de los refrigerantes secundarios más utilizados en la industria debido a su bajo costo y formas de presentación, el mismo presenta diferentes propiedades tanto químicas como físicas por el cambio de solución concentrada en agua lo que hace que estas salmueras se adapten con gran facilidad a diferentes tipos de procesos.

Motivo por el cual el estudio del comportamiento al variar sus condiciones de servicios y propiedades químicas resulta muy atractivo para determinar estándares de funcionamientos de los equipos diseñados a estas condiciones. A través del análisis de las curvas de enfriamiento en operación se tiene información valiosa para el aprovechamiento más eficiente de este tipo de máquinas refrigeradoras.

1.2 Justificación

En base a la necesidad de promover la investigación y generación de conocimiento que permitan crear emprendimientos en el área de la energía y refrigeración para la mejora de procesos con una mejor y mayor comprensión de los mismos se requiere de un trabajo de investigación sobre la manipulación de un equipo de refrigeración industrial, para este caso particular se indaga las condiciones de un chiller buscando ampliar el entendimiento de lo que se produce al cambiar los parámetros de funcionamiento de este tipo de servicio.

El interés científico de la presente investigación, se basa en la importancia de ampliar conocimientos acerca del comportamiento de equipos industriales que se podrían construir en el país y posibles variaciones que se pueda efectuar en ellos, para esto se utilizará el equipo del laboratorio de transferencia de calor de la escuela de Ingeniería Mecánica que contribuye a los estudiantes con conocimientos generales de la aplicación de un chiller y el uso de anticongelantes que se usan para estos procesos de refrigeración.

El proyecto aporta a la solución de una mejora en la situación de recolección de datos mediante la repotenciación del equipo refrigerador y más importante aún establecer curvas de comportamiento al variar las condiciones de trabajo, lo cual sin duda es un caso de interés para incursionar en el desarrollo de este tipo de procesos. Actualmente la información de este tipo de estudios en el país es muy escasa por lo que vale la pena realizar esta investigación que permitirá levantar un informe que exponga datos, cifras y porcentajes de la efectividad del equipo al variar las condiciones óptimas de trabajo.

El estudio se resumirá en un artículo científico investigativo que ayudará a consolidar futuros estudios sobre problemáticas similares, aumentando el interés investigativo, competencias profesionales de indagar y proponer posibles soluciones sobre nuevos casos de estudio en estos equipos de acondicionamiento y control de temperatura de procesos.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.* Repotenciar y analizar los datos del chiller del laboratorio de transferencia de calor para determinar la tendencia de las curvas de enfriamiento.

1.3.2 *Objetivos específicos:*

- Conocer los principios funcionales de un equipo de refrigeración chiller para una operación eficiente.
- Establecer las propiedades químicas que afectan la extracción de calor de la solución de salmera concentrada en cloruro de calcio.
- Evaluar las condiciones técnicas actuales del equipo.
- Realizar la toma de datos de variables del estado actual del chiller.
- Seleccionar los equipos e instrumentos necesarios para la adquisición de datos requeridos en la repotenciación.
- Realizar las pruebas de funcionamiento del chiller.
- Realizar un análisis de costos necesario para implementación del proyecto de estudio.
- Realizar un artículo científico de las curvas de enfriamiento del sistema a través de los datos obtenidos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Teoría de refrigeración

En general el proceso de refrigeración es confundido por la mayoría de personas con el término enfriamiento cuando no es más que un proceso de transferencia de calor. La refrigeración consiste en descender la temperatura de determinado recinto o cámara por debajo de la del medio ambiente y que se mantenga a esa temperatura, para esto es necesario extraer el calor de dicho recinto de manera continua o al menos intermitente en un ciclo cerrado. (ASHRAE, 2010)

En equipos de refrigeración la transferencia de calor se lleva a cabo a través de fluidos conocidos como refrigerantes, el calor pasa de un cuerpo caliente a uno frío por la aportación de un trabajo mecánico o calor del exterior. La refrigeración por compresión de vapor es un caso de aportación de trabajo mecánico y se ha constituido en el método más utilizado en la actualidad para equipos que no necesitan entregar mayor capacidad. (TECUMSEH, 2002)

2.1.1 Calor. Es una forma de energía que se manifiesta y procede por la transformación de otros tipos de energía. Se origina por movimientos vibratorios de átomos y moléculas de la materia, definido como energía de tránsito, ya que siempre está conduciéndose de un cuerpo caliente a uno frío.

Se debe recordar que los cuerpos tienen energía interna mas no calor, a diferente temperatura parte de ésta energía se transfiere entre sistemas o cuerpos, donde la transferencia de calor se producirá hasta que se llegue a la misma temperatura alcanzándose el denominado equilibrio térmico.

Para cuantificar el calor las unidades que se utilizan son: en el SI, el Julio o Joule (J) como unidad de energía, la caloría (cal) también es usada y es la cantidad de calor necesaria para que un gramo de agua incremente su temperatura 1 °C, la unidad inglesa es muy aceptada comercialmente en equipos de diferente campo industrial sobre todo en el acondicionamiento de aire y refrigeración, siendo el BTU (British Thermal Unit) la cantidad de energía calórica para que una libra de agua incremente su estado de temperatura 1 °F (COPELAND, 2010)

2.1.2 *Calor sensible.* Es el que recibe una sustancia provocando un cambio de temperatura en la misma, es decir, que incrementa la temperatura sin provocar un cambio molecular o de fase en la sustancia. (INCROPERA, 1999)

La constante de proporcionalidad llamada calor específico es la medida de calor necesaria para incrementar una unidad de masa a una unidad de temperatura a presión o volumen constante, para lograr un cambio de temperatura depende del mismo la cantidad de calor a suministrar, lo que significa que cuanto más grande sea su magnitud más energía necesita la sustancia para variar su temperatura, puede calcularse por la ecuación (1). (HOLMAN, 1998)

$$Q_s = \dot{m}c_p(t_2 - t_1) \quad (1)$$

Dónde:

Q_s = Calor sensible [kJ/min]

\dot{m} = Flujo másico de la sustancia [kg/min]

c_p = Calor específico a presión constante [kJ/(kg·K)]

$t_2 - t_1$ = variación de temperatura [K]

2.1.3 *Calor latente.* Es la cantidad de energía que una sustancia necesita ganar o perder para cambiar de fase, en caso de un sólido a líquido (calor de fusión) o un líquido en gas (calor de vaporización) tomando en cuenta que durante estos procesos no hay variación de temperatura. La palabra latente significa “algo que está oculto”, por tanto este calor requerido no varía la temperatura para cambiar de fase pero su estado de agregación si se modifica. (INCROPERA, 1999)

2.1.3.1 *Calor latente de fusión.* Es la energía necesaria para modificar el estado de agregación de una sustancia de sólida a líquida o líquida a sólida, sin cambiar su temperatura, se calcula con la ecuación:

$$Q_{LF} = \dot{m} \cdot h_{if} \quad (2)$$

Dónde:

Q_{LF} = Calor latente de fusión [kJ/min]

\dot{m} = Flujo másico de la sustancia [kg/min]

h_{if} = Entalpia de fusión [kJ/kg]

2.1.3.2 Calor latente de evaporación. Es la energía necesaria para modificar el estado de agregación de una sustancia de líquido a vapor o de vapor a líquido, sin variar la temperatura de la misma, también es llamado calor latente de ebullición o de vaporización, puede calcularse por la siguiente ecuación. (INCROPERA, 1999)

$$Q_{LV} = \dot{m} \cdot h_{fg} \quad (3)$$

Dónde:

Q_{LV} = Calor latente de vaporización [kJ/min]

\dot{m} = Flujo másico de la sustancia [kg/min]

h_{fg} = Entalpia de vaporización [kJ/kg]

2.1.4 Refrigerantes. Toda sustancia capaz de absorber enormes cantidades de calor con una variación e incremento de su calor sensible es denominada refrigerante debido a la mayor diferencia de temperaturas en la transferencia de energía calorífica. Para procesos de refrigeración mecánica se requieren refrigerantes que transporten grandes cantidades de energía calórica de una forma económica y eficiente, Además que puedan recircular en procesos de evaporamiento y condensación. En la práctica cualquier fluido líquido podría ser usado en procesos de absorción de calor por evaporación. (VILLANUEVA, 1995)

2.1.4.1 Clases de refrigerantes. En el mercado existen gran variedad de tipos de refrigerantes, algunos de los cuales se usaban comúnmente base cloro, sobre todo en instalaciones viejas se empleaban bióxido de sulfuro, cloruro metílico y el amoníaco.

La concientización los ha ido rechazando debido principalmente a su toxicidad y han sido reemplazadas por otra gama creadas especialmente para su utilización en refrigeración. Son identificados por su número correspondiente R-12, R-22 o R-404A, mas no por su nombre comercial.

Refrigerantes HFC's. Su composición contiene principalmente hidrógeno, flúor y carbono, la ausencia de cloro lo hace más amigable con la capa de ozono razón por lo cual este tipo de refrigerante ofrece alternativas más satisfactorias para reemplazo a largo plazo de los refrigerantes que usan composiciones más tóxicas.

A nivel industrial el más usado es el R-404A reemplazo directo de su antecesor R-502 que es un CFC denominado por su composición como un clorofluorcarbonado al que se le prohibió su fabricación desde 1995 y del R-22 que es un HCFC conocido como un hidroclofluorcarbonado también prohibido desde el 2004. El R-404 es una composición variada cuyo comportamiento no es el de un refrigerante puro ya que no tiene condensación ni evaporación constante, lo que hace que la carga del mismo sea en estado líquido. Ha tenido gran aceptación en vitrinas frigoríficas, Transporte refrigerado, elementos congelados en exposición, hieleras, etc. (VILLANUEVA, 1995)

Tabla 1. Refrigerantes que tenderán a sustituir a los contaminantes.

Uso o servicio	CFC/HCFC	HFC
Limpieza	R-11	R-141b
Temperatura medianas	R-12	R-134A/R-409
Temperaturas menores	R-502	R-404/R-408
Acondicionamiento de aire	R-22	R-407C

Fuente: Maxitec.com/gases refrigerantes

2.1.5 *Sistema de refrigeración.* Un sistema frigorífico es un arreglo mecánico que se vale de los principios termodinámicos de los materiales para transportar energía térmica como lo requiera. Son diseñados principalmente para disminuir la temperatura de diferentes productos, diferenciándose de un circuito de refrigeración que no es más que un arreglo para bajar la temperatura. (ASHRAE, 2010)

2.1.6 *Refrigeración por compresión de vapor.* En este tipo de refrigeración se toma en cuenta un desplazamiento de energía térmica confinada en intercambiadores de calor, el proceso de intercambio de energía crea dos zonas la de alta y baja presión, y se logra cuando el refrigerante cambia su estado de agregación o estado de fase a través de un mecanismo de expansión en el interior del intercambiador denominado evaporador.

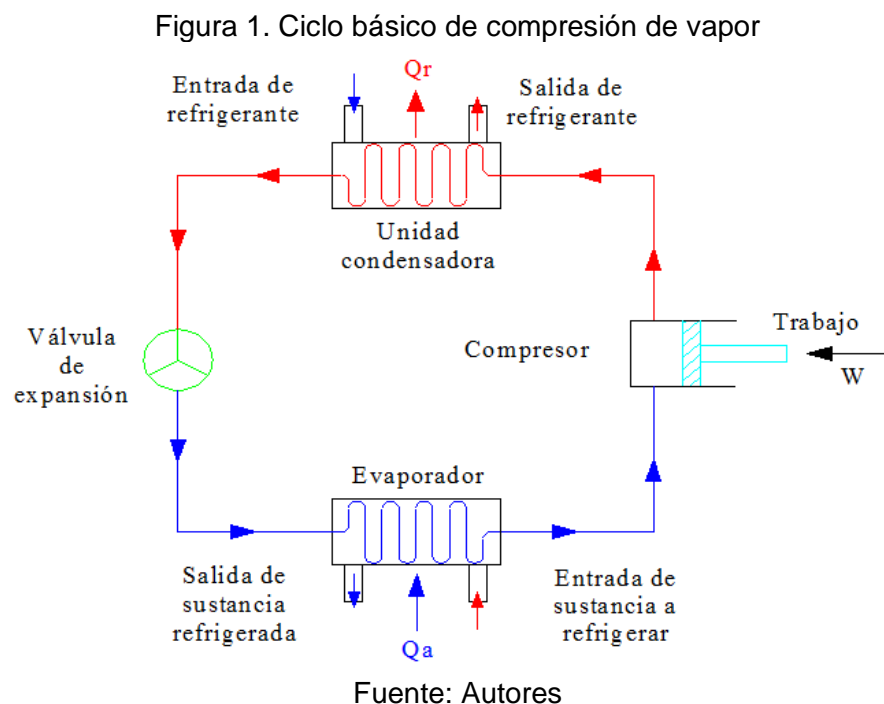
Para que el refrigerante cambie su estado necesita absorber calor latente de vaporización, una vez en estado de vapor el refrigerante gana energía térmica gracias al evaporador y su medio de contacto.

Pasado el intercambio de energía para incrementar la presión del vapor se utiliza un compresor mecánico con el fin de condensar el vapor en el interior de otro intercambiador llamado condensador, en él se libera los componentes de la carga térmica cedida del medio de contacto del evaporador tanto el calor sensible como el

latente, el aumento de presión también provoca mayor temperatura y se requiere un sub enfriamiento de la carga por medio de agua y/o aire según el tipo de condensador, así de nuevo en estado líquido el refrigerante puede evaporarse otra vez y comenzar otro ciclo.

2.2 Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

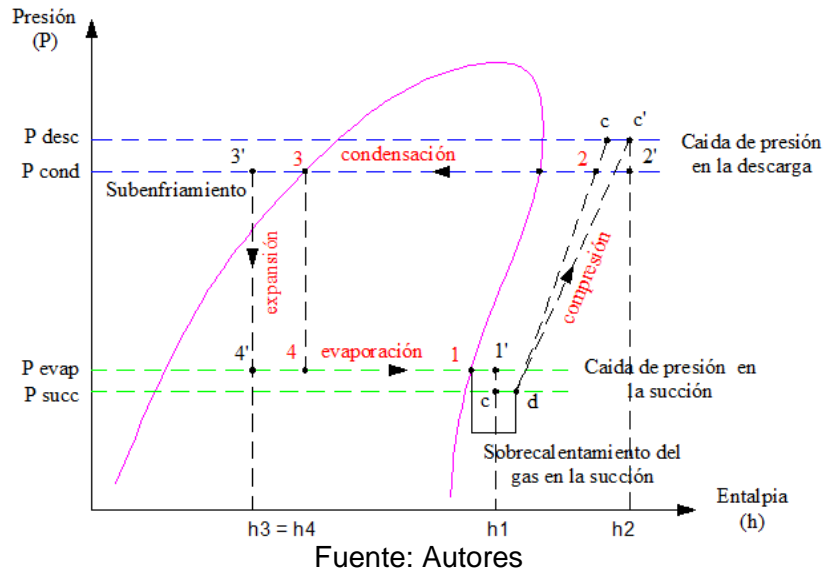
En todo sistema de compresión de vapor para un caso ideal todo el flujo es sin fricción, sin tomar en cuenta la estrangulación, y todos los procesos a excepción de los del condensador y del evaporador son adiabáticos. (THOMPSON, 1970)



Como se dijo antes el proceso de intercambio de energía crea dos zonas la de evaporación o baja presión y la de condensación o alta presión. Con el fin de quitar calor del evaporador se usa el refrigerante como medio de transporte que con ayuda de un ventilador intercambiara este calor al ambiente. En el cambio del estado de agregación el refrigerante gana y pierde grandes cantidades de energía térmica gracias al evaporador y su medio de contacto en forma eficiente.

Para un proceso de refrigeración real la presión de succión del vapor correspondiente a la temperatura de saturación del refrigerante tiene que ser menor a la temperatura del medio convectivo para que con esto exista la posibilidad de tener un flujo de calor en la dirección que se requiere para expedir calor.

Figura 2. Proceso real - Diagrama presión-entalpía



2.2.1 Proceso de compresión. En este proceso para incrementar la presión la unidad de compresión toma el gas refrigerante vaporizado a baja presión y lo comprime aumentando su presión y por tanto su temperatura, el vapor sobrecalentado por el incremento de presión es bombeado a través de una válvula para la descarga hacia el condensador, se prefiere que el gas refrigerante en el estado 1 este sobre la curva de vapor saturado como se muestra en la figura 2. En función del proceso de compresión se realizaran los procesos siguientes.

2.2.2 Proceso de condensación. El objetivo del condensador es el de sub enfriar el refrigerante levemente en una pequeña cantidad, se utiliza disipadores de calor en forma de serpentín con pequeñas varillas y por lo general aletas para incrementar su transferencia de calor con el medio, además para aumentar su rendimiento también ciertos modelos vienen equipados con un ventilador de gran capacidad.

2.2.3 Proceso de expansión. Es necesario que el refrigerante pase de una zona de alta presión a una zona de baja presión por medio de un orificio bastante pequeño, la reducción de presión se logra con una válvula de expansión, con la cual el refrigerante líquido hierve o se vaporiza hasta que alcance su respectiva temperatura de saturación correspondiente a la de su presión lo que significa un cambio brusco para que se pueda absorber calor dentro del evaporador aprovechando la energía que le sigue continuando el ciclo.

2.2.4 Proceso de evaporación. Al continuar el ciclo de refrigeración se tiene que el refrigerante a baja temperatura y presión continúan su paso por el evaporador.

La energía en forma de calor fluye a través de las paredes o tuberías del mismo en contacto con el refrigerante convirtiendo a este una vez más en vapor saturado, con este fin la válvula de expansión se encarga de regular el flujo de refrigerante que circula a través del evaporador para mantener una diferencia de temperatura asignada. (ASHRAE, 2010)

2.3 Fundamentos de análisis para equipos de refrigeración

2.3.1 *Unidades de capacidad.* Un concepto que se sigue manteniendo cuando se habla de la refrigeración por aportación de trabajo mecánico o refrigeración mecánica es el de unidades de capacidad, recordando el hecho de que antes de este tipo de refrigeración se usaba el hielo para conservar los alimentos, se sabe que una tonelada de hielo se funde a 32 °F por día absorbiendo calor a una razón de 12 000 BTU/h.

$$1 \text{ tonelada de refrigeración} = (144 \text{ BTU/lb} \times 2\,000 \text{ lb}) / 24 \text{ h}$$
$$1 \text{ TR} = 12\,000 \text{ BTU/h}$$

Se debe tomar en cuenta que 1 tonelada es una razón de flujo de calor donde el sistema de refrigeración es capaz de extraer calor a una razón de 12 000 BTU/hr, por ejemplo si hablamos de un equipo de refrigeración de 3 toneladas quiere decir que es capaz de absorber calor a una razón de 36 000 BTU por hora en el evaporador.

2.3.2 *Efecto de refrigeración.* Denominado como la cantidad de calor que un refrigerante es capaz de absorber mientras fluye en el evaporador como líquido y terminando como vapor. Podemos referir el hecho que los líquidos tienen un buen efecto de refrigeración por su alto calor latente de vaporización, por lo mismo se puede decir, que no es más que la diferencia de calor por el cambio de fase al pasar por el evaporador.

Cuando el refrigerante en estado líquido se aproxima a la válvula su temperatura generalmente siempre es mayor que la temperatura de vaporización del refrigerante dentro del serpentín del evaporador, de lo mismo podemos deducir que el efecto de refrigeración normalmente es menor que el calor de vaporización.

Hablando de un ciclo teórico de refrigeración hemos establecido que el refrigerante absorbe calor solo cuando este fluye a través del evaporador sin tomar en cuenta que puede ganar o perder calor al fluir por las tuberías entre la válvula de expansión y el

evaporador dependiendo de la temperatura del ambiente convectivo exterior, en el proceso de estrangulamiento no existe cambio de entalpia del refrigerante por esta razón al fluir por la válvula de expansión el refrigerante no gana ni pierde calor.

Para mayor comprensión de este fenómeno en el sistema de refrigeración del chiller que usa un gas refrigerante R404, podemos asumir que el mismo ingresa al evaporador a una temperatura 52 °F y sale saturado a 90 °F, entonces el efecto de refrigeración será:

Tabla 2. Resumen de propiedades del refrigerante R404.

T[°F]	Pressure [psia]		Enthalpy [Btu/lb]			Entropy [Btu/(lb·°R)]	
	Liquid p _f	Vapor p _g	Liquid h _f	Latent h _{fg}	Vapor h _g	Liquid s _f	Vapor s _g
50	120,06	118,43	29,70	68,40	98,10	0,0634	0,1978
51	122,02	120,38	30,00	68,20	98,20	0,0641	0,1978
52	124,00	122,35	30,40	67,90	98,30	0,0648	0,1977
.....
90	219,21	217,19	44,90	57,20	102,10	0,0916	0,1958
91	222,28	220,26	45,30	56,90	102,20	0,0923	0,1957

Fuente: Catálogo refrigerante SUVA R-404A DUPONT.

Al ingreso del evaporador la presión de saturación a 52 °F es 122,35 psia y la entalpia de saturación h_g de 98,3 Btu/lb, en cambio a 90 °F una entalpia h_f de 44,9 Btu/lb.

$$\text{Efecto de refrigeración} = 98,3 - 44,9 = 53,4 \text{ BTU/lb}$$

Para llegar a la presión de vapor p_g de 122,35 psia se realiza una expansión que baja la temperatura del líquido de 90 °F a 52 °F temperatura a la cual termina el proceso de calor sensible debido a que una pequeña porción de líquido se vaporiza, aproximadamente un 14% en sistemas de funcionamiento normal.

En el descenso de temperatura el líquido perdió calor sensible que se convirtió en calor latente más vapor flash o flash gas, que significa una evaporación instantánea.

$$h_f(90 \text{ °F}) - h_f(52 \text{ °F}) = 44,9 - 30,4 = 14,5 \text{ BTU/lb}$$

El refrigerante en estado líquido absorbe estos 14,5 BTU razón por la cual se vaporiza antes de tiempo parte del mismo, el calor latente a 52 °F teóricamente es h_{fg} = 67,9 BTU/lb pero en el descenso de temperatura se usaron 14,5 BTU/lb.

Ahora bien al final el efecto de refrigeración estimado solo por el proceso de vaporización del refrigerante es lo que queda disponible:

$$67,9 - 14,5 = 53,4 \text{ BTU/lb}$$

Tomando en cuenta el hecho de que no puede entrar líquido en el compresor generalmente se produce un sobrecalentamiento aproximadamente de unos 10 °F en el evaporador, entonces el efecto de refrigeración para el sistema de acondicionamiento de presión es:

Calor sensible	30,4 BTU/lb
Calor latente	67,9 BTU/lb
Calor por sobrecalentamiento $1 \times 0,51 \times 52$	26,5 BTU/lb
Total	124,8 BTU/lb

Con el sobrecalentamiento el efecto de refrigeración es: $124,8 - 44,9 = 79,9 \text{ BTU/lb}$

En todo sistema de refrigeración en condiciones normales de funcionamiento tenemos que el efecto de refrigeración es un 86% del calor latente absorbido en cada libra de refrigerante y con un sobrecalentamiento de 10 °F aproximadamente.

2.3.3 Flujo del refrigerante en circulación. En el evaporador el refrigerante absorbe calor que puede calcularse con la ecuación (3) de calor latente de vaporización donde la entalpia de evaporación sería el efecto de refrigeración, la ecuación modificada es la siguiente:

$$q = \dot{m} \cdot ER \tag{4}$$

Dónde:

q = Calor que absorbe el evaporador [kJ/min]

\dot{m} = Flujo másico de la sustancia [kg/min]

ER = Efecto de refrigeración [kJ/kg]

Con esta ecuación se puede determinar el flujo en peso del refrigerante para que el sistema de refrigeración funcione en condiciones favorables siempre que se conozca su capacidad y condiciones en las que opera.

2.3.4 Coeficiente de rendimiento. El abreviado COP se denomina coeficiente de rendimiento y es la razón o cociente entre el efecto de refrigeración y el trabajo realizado por la unidad condensadora expresados en unidades semejantes.

$$\text{COP} = \text{ER} / \text{Trabajo efectuado por el compresor}$$

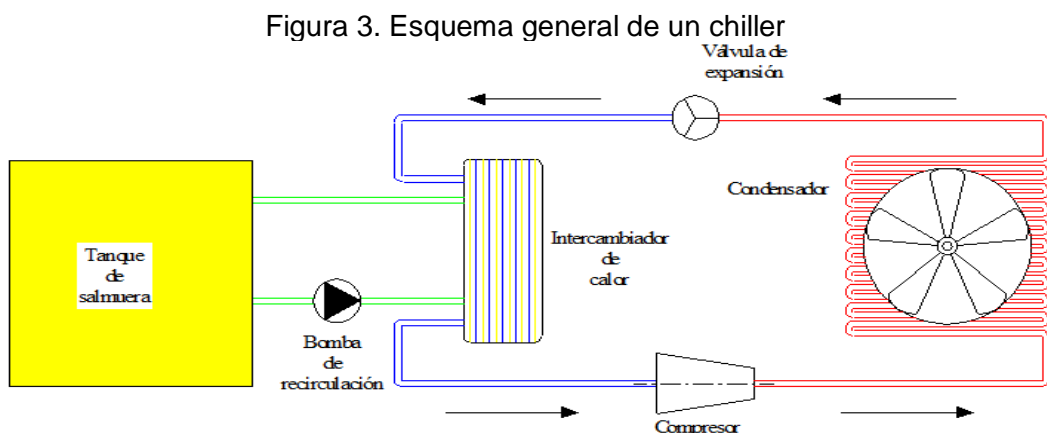
2.3.5 *Análisis del efecto de presión en la succión.* Para el proceso de refrigeración por compresión simple una reducción fuera de lo normal en la presión provoca un cambio drástico en el efecto de refrigeración con un aumento innecesario en la potencia teórica requerida por tonelada de refrigeración.

2.3.6 *Análisis del efecto de presión en la descarga.* Si en determinado sistema de refrigeración se tiene un aumento de la presión de descarga este hecho provoca una reducción en la capacidad de enfriamiento del sistema con su respectivo incremento de la energía necesaria por flujo en masa de refrigeración. Este efecto en la descarga es de menor impacto en comparación al de la succión pero también es negativo.

2.4 Chiller

Por definición chiller proviene del vocablo inglés “chill” significando helar, por consiguiente un chiller es un equipo enfriador industrial en general de agua, anticongelante o cualquier tipo de salmuera que es común en el tratado de alimentos.

El objetivo principal del equipo chiller es el intercambio de calor en determinado proceso con el cual se extrae calor de un fluido, la energía calorífica ganada retorna a la unidad de enfriamiento y así reduce su temperatura repitiendo el proceso de circulación. (COPELAND, 2010)



Fuente: Autores

A partir del proceso destinado se necesita de distintos caudales, presión y temperatura del fluido a refrigerar en determinadas ocasiones incluso por debajo de los cero grados centígrados, para manejar estas temperaturas es necesario la adición de sustancias anticongelantes industriales como es el caso de glicoles del etilenglicol o bases cloruro industriales.

2.5 Componentes importantes del sistema de refrigeración chiller

2.5.1 *Compresor hermético.* Desarrollado para lograr un menor tamaño y costo. Se usa para equipos que necesitan una baja y media potencia, constan de un motor eléctrico que rota un cigüeñal dentro de una carcasa metálica herméticamente sellada con aplicación de soldadura, solo los de mediana potencia poseen válvulas para la carga o si es el caso reemplazo del aceite. (COPELAND, 2010)

Figura 4. Evaporador de placas.



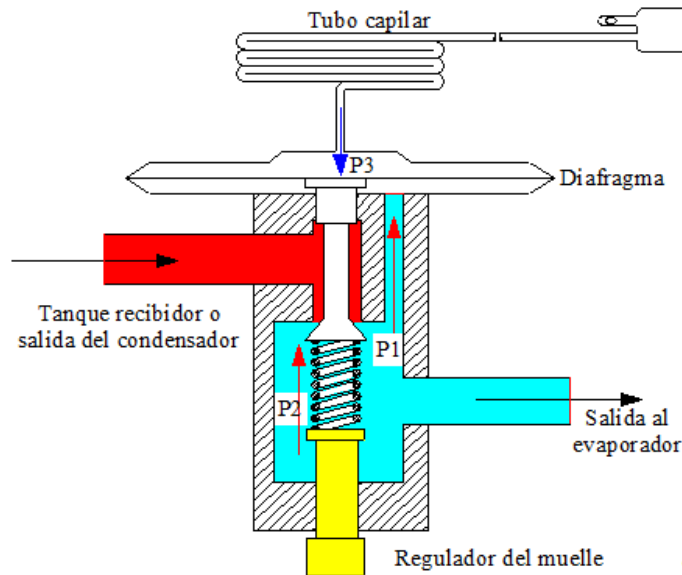
Fuente: http://www.plate-heat-exchanger.com/photo/pl1191050-brazed_heat_exchanger_evaporator_bl14_danfoss_b3_014_high_heat_efficiency_copper_brazed_plate_heat_exchanger.jpg

2.5.2 *Evaporador de placas.* En procesos que trabajan con una temperatura inferior a 0 °C se usa este tipo de intercambiadores porque además los volúmenes a enfriar son en relación industrial pequeños. Según el proceso que se desee la composición de la solución a enfriar varía, cambiando los puntos eutécticos de congelamiento y de fusión. Las temperaturas de tratamiento pueden variar desde -1 °C hasta -31 °C.

Para estos fines se usa composiciones diluidas conocidas industrialmente como salmueras, estas son empleadas como anticongelante y están constituidas a base generalmente de alcohol neutro de 90 grados (glicol), cloruro de calcio o cloruro sódico (sal común) disueltos en agua, la concentración de la misma depende de la temperatura del cambio crioscópico. (Universidad de Valladolid, 2005)

2.5.3 Válvula de expansión. Se lo denomina como un dispositivo controlador utilizado para control el flujo en masa del refrigerante líquido dentro del evaporador. Un orificio en la válvula se encarga de controlar el flujo, este flujo másico de refrigerante es manejado por un vástago y una aguja de asiento que varía la abertura del paso.

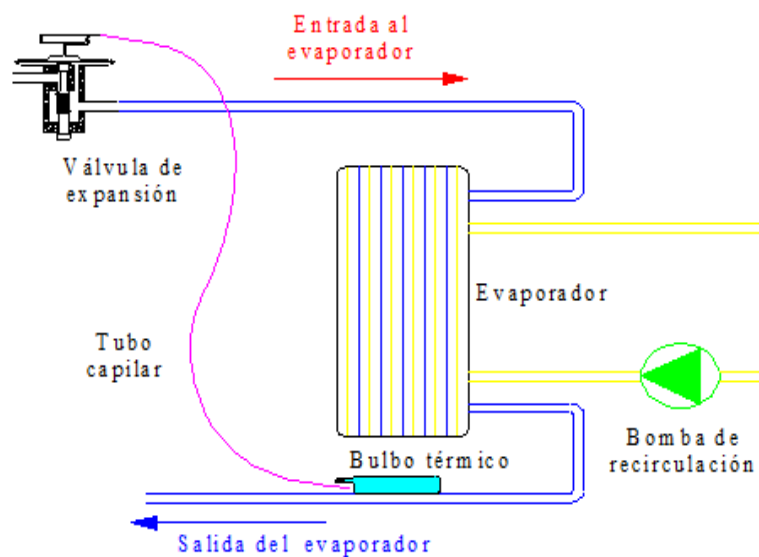
Figura 5. Vista de corte de una válvula de expansión termostática



Fuente: Autores

Según el incremento de temperatura del gas refrigerante que sale del evaporador, la presión por el evaporador se incrementa mediante un bulbo térmico colocado en la salida, el flujo del refrigerante a que atraviesa la válvula de expansión sube a medida que el refrigerante disminuye su temperatura.

Figura 6. Ubicación de un bulbo térmico en un sistema de refrigeración



Fuente: Autores

2.5.4 *Carga de refrigerante.* En sistemas de sobrealimentación se prefiere más refrigerante a diferencia de los sistemas de expansión seca. El flujo en masa de refrigerante depende del volumen del evaporador principalmente, además de la tasa de circulación, tamaños de líneas de flujo y de retorno, la temperatura de funcionamiento diferencias, y los coeficientes de transferencia de calor.

Comúnmente la parte superior de la alimentación de los evaporadores trabaja con la carga de refrigerante que ocupa alrededor del 25% a 40% del volumen del evaporador. En cambio para la carga de refrigerante de la parte inferior de alimentación ocupa aproximadamente 60% a 75% del volumen del evaporador, con las variaciones correspondientes en los retornos húmedos. En casos diferentes algunas condiciones sin carga de alimentación puede ocupar 100% del volumen del evaporador, por consiguiente el aumento de líquido volumen de plena carga a carga no debe considerarse en el dimensionamiento de la receptor de baja presión. (Miller, 1974)

2.5.5 *Efecto de carga de refrigerante en el evaporador.* Para evaporadores con grandes tasas de transferencia de calor, como es el caso de máquinas de hielo en escamas y los intercambiadores de calor de superficie aletada, solo necesitan cargas pequeñas por el menor volumen del evaporador. El flujo en masa del refrigerante en la zona de baja presión tiene un efecto importante en el receptor del lado de baja, especialmente en recipientes horizontales.

El área de sección transversal para el flujo de vapor en recipientes horizontales se reduce con el aumento de líquido nivel. Es necesario determinar la carga de refrigerante del evaporador con la variación de las cargas para el correcto diseño, sobre todo para un receptor de presión baja que no tiene un control de nivel constante, sino que se alimenta a través de un control de alta presión. (Miller, 1979)

2.6 Formas de transferencia de calor

La transferencia de calor es un transporte de energía puede realizarse por tres formas: conducción, radiación y la convección. Tanto la conducción como la radiación son procesos de transporte de energía con una diferencia acentuada de temperatura, para el caso de la convección involucra más un intercambio de masa. (CHAPMAN, 1984)

2.6.1 *La conducción térmica.* Para este proceso de transferencia de calor la energía se transfiere por la interacción molecular de cuerpos en contacto directo, es

decir a nivel atómico los átomos, electrones o moléculas adyacentes transportan la energía para fluir el calor de los cuerpos más calientes a los más fríos, en el caso de flujo unidireccional y en un estado estable se puede calcular el flujo de calor mediante la ley de Fourier que se representa por la ecuación: (INCROPERA, 1999)

$$Q = -k A \frac{dt}{dL} \quad (5)$$

Dónde:

Q = Calor conducido a través de una superficie A [kJ/min]

dL= Espesor de la pared [m]

dt= Variación de temperatura [K]

k= Conductibilidad térmica del material [W/(m·K)]

dt/dL = Gradiente de temperatura a través de la trayectoria

Al mencionar la conductividad térmica se dice que varía ampliamente, al igual que la conductividad eléctrica debido a su estado según el material, ésta diferencia no es muy apreciable dentro los cuerpos sólidos sino en líquidos y gases. (CHAPMAN, 1984)

2.7 Anticongelantes para refrigeración industrial

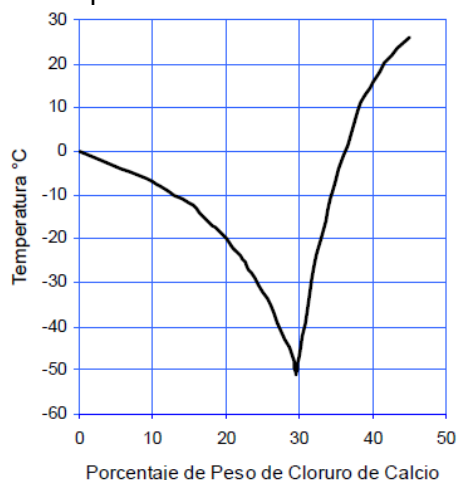
Se denomina anticongelante a un compuesto químico que añade un aditivo para disminuir su punto de congelación mejorando su acción y efecto refrigerante, el agua a pesar de ser el líquido más idóneo para refrigerar debido a su elevado calor específico y su buena conductividad térmica queda imposibilitado para procesos que involucran temperaturas por debajo de los cero grados centígrados.

2.7.1 Anticongelantes con base cloruro. Su uso eficiente es bastante amplio debido a las propiedades de anti congelamiento que ofrece, el más general es el cloruro de sodio NaCl o también llamada sal común por su simplicidad de uso y además que ofrece costos bastante módicos.

Para usos industriales se usa una mezcla en solución de cloruro de calcio CaCl₂, muy utilizado por su bajo costo y adaptabilidad a los cambios crioscópicos en base a su concentración, sin embargo uso es restringido por entidades de gobierno para personas naturales ya que el mismo podría ser utilizado para procesos de refinamiento en estupefacientes o sustancias psicotrópicas que son penados por la ley.

La solubilidad, densidad y calor específico del cloruro de calcio varía según la concentración deseada, este tipo de salmueras se obtiene el punto crioscópico mínimo para el congelamiento al 30% de concentración de la solución. Del diagrama que se muestra se debe tener en cuenta la importancia de mantener un anti congelante en estado líquido total, éste proceso de descenso sobre el punto de congelación en una sustancia se lo conoce como efecto crioscópico. (OCCIDENTAL, 2006)

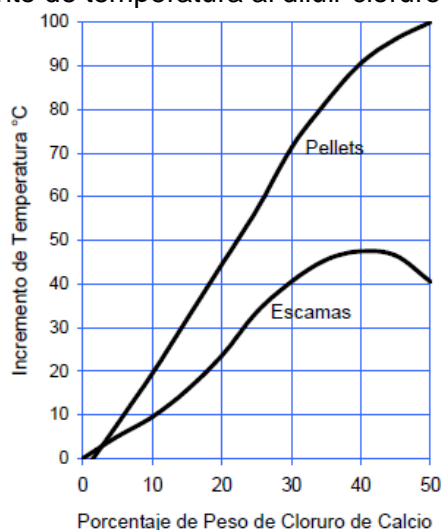
Figura 7. Diagrama de fases para cloruro de calcio a diferentes concentraciones



Fuente: Manual para el cloruro de calcio de Occidental Chemical Chile Limitada.

2.7.1.1 Temperatura al disolver. Para preparar una salmuera disuelta en agua, el efecto cinético por composición libera una considerable cantidad de energía calorífica por lo cual se debe tener cuenta que la nueva solución no sobrepase la temperatura de vaporización del agua, de lo contrario se tiene una drástica pérdida del compuesto en el medio ambiente.

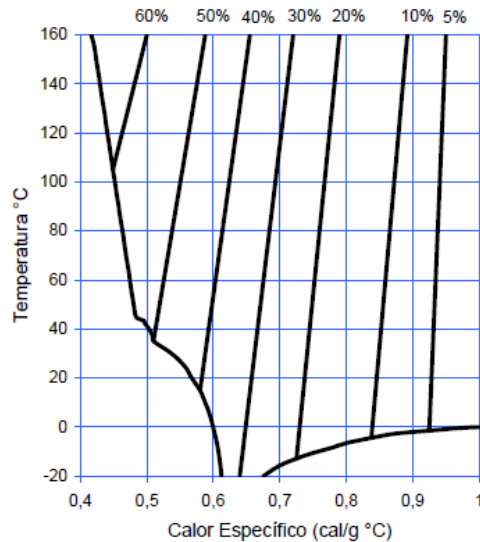
Figura 8. Incremento de temperatura al diluir cloruro de calcio en agua.



Fuente: Manual para el cloruro de calcio de Occidental Chemical Chile Limitada

En un caso hipotético según el anterior monograma al disolver el cloruro de calcio en escamas en un porcentaje en masa del 20% se tiene un pretende un aumento de temperatura de alrededor de los 23 °C.

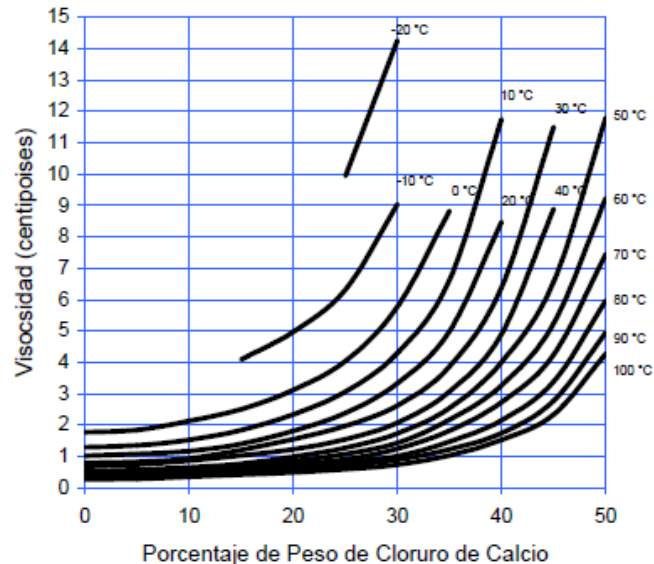
Figura 9. Calor específico de soluciones acuosas de CaCl₂.



Fuente: Manual para el cloruro de calcio de Occidental Chemical Chile Limitada

Para diferentes soluciones de cloruro de calcio se nota un cambio prominente de la viscosidad del fluido compuesto por ende existirá variación del comportamiento del equipo cambiando los respectivos puntos operacionales del sistema de bombeo.

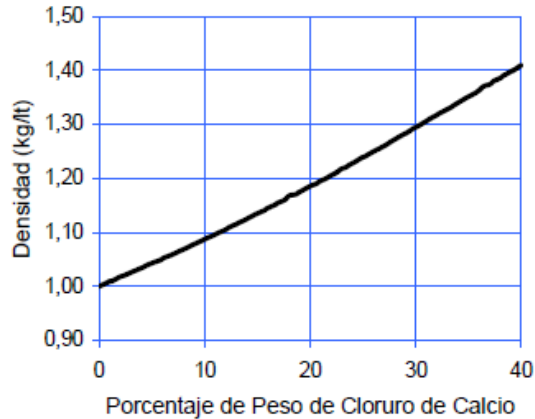
Figura 10. Viscosidad absoluta de soluciones de cloruro de calcio



Fuente: Manual para el cloruro de calcio de Occidental Chemical Chile Limitada.

Para un análisis termodinámico de una solución concentrada en cloruro de calcio se debe analizar el cambio de viscosidad, calor específico por la variación a temperatura.

Figura 11. Densidad de soluciones de cloruro de calcio.



Fuente: Manual para el cloruro de calcio de Occidental Chemical Chile Limitada.

2.8 Pérdidas de energía hidráulica

2.8.1 Pérdidas primarias. La ecuación de Darcy-Weisbach se utiliza para determinar las pérdidas de energía en función de la longitud de tubería y velocidad del flujo, la misma que se expresa de la siguiente forma:

$$H_r = \lambda \frac{Lv^2}{2dg} \quad (6)$$

Dónde:

H_r = Pérdidas primarias [mca]

λ = Coeficiente de fricción

L = Longitud de tubería [m]

v = Velocidad media del flujo [m/s]

d = Diámetro interno de la tubería [m]

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2]

El coeficiente de fricción λ es adimensional y depende del número de Reynolds, rugosidad de la tubería y tipo de flujo.

Número de Reynolds. Este número caracteriza al tipo de flujo, el cual puede ser: laminar, turbulento o hallarse dentro de la zona de transición, viene definido por: (CENGEL, 1998)

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

Dónde:

Re = Numero de Reynolds

D_h = Diámetro hidráulico de la tubería [m]

ρ = Densidad del fluido [kg/m^3]

v = Velocidad del fluido [m/s]

μ = Viscosidad cinemática [m^2/s]

Para el caso de flujo laminar ($0 \leq \text{Re} \leq 2\,000$) el coeficiente de fricción se determina por la ecuación establecida por Hagen y Poiseville.

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (8)$$

Para el caso de flujo turbulento se propone la ecuación de Blasius para un régimen de Reynolds de $2\,000 \leq \text{Re} \leq 10\,000$ debido a la inestabilidad en el perfil de velocidades.

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad (9)$$

2.8.2 Pérdidas secundarias. Se considera pérdidas secundarias a todos los accesorios acoplados a la tubería del sistema de bombeo como: Codos, tees válvulas, intercambiadores, reducciones y demás componentes del sistema, se determina como se indica a continuación:

$$H_{ra} = k \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

Dónde:

H_{ra} = Pérdidas secundarias [mca]

k = Coeficiente de resistencia

v = Velocidad del flujo [m/s]

2.9 Altura útil efectiva

Es la altura que debe desarrollar la bomba para vencer las pérdidas primarias y secundarias del sistema de bombeo tanto en la succión como en la descarga. Se cuantifica en función de la energía consumida de la siguiente manera:

$$H_T = h_d + h_s \quad (11)$$

Dónde:

H_T = Altura útil efectiva [mca]

h_d = Columna dinámica en la descarga [m]

h_s = Columna dinámica en la succión [m]

2.9.1 *Columna dinámica de succión.* Conocida también como altura de aspiración, es la elevación relativa desde el límite superior de un fluido confinado hasta la lineación de la bomba. Se determina como se indica a continuación en la que cada factor aporta o resta energía hidráulica de presión.

$$h_s = h_{es} + h_{vs} + H_{rs} \pm h_{ps} \quad (12)$$

Dónde:

h_s = Columna dinámica de succión [mca]

h_{es} = Altura estática [mca]

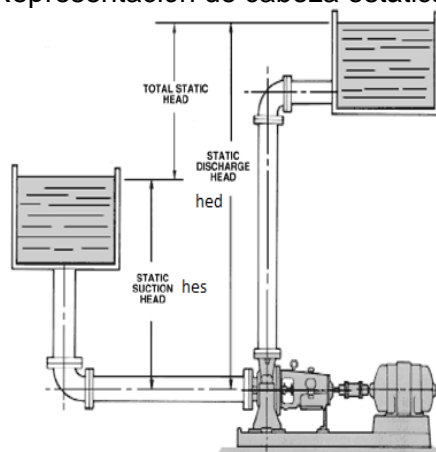
h_{vs} = Carga por velocidad en la succión [mca]

H_{rs} = Carga por pérdidas en la succión [mca]

h_{ps} = Presión en la q se encuentra el tanque [mca]

Si este nivel de fluido está por encima de la lineación del eje de la bomba h_{es} es positivo y se denomina cabeza estática de succión.

Figura 12. Representación de cabeza estática de succión.



Fuente: http://lh6.ggpht.com/farancibiacarvallo/SJ8CWqRsWal/AAAAAAAAEWY/S9fx2XMW2UU/s1600-h/clip_image0083.jpg

CAPÍTULO III

3. ESTUDIO DE LA CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO DE REFRIGERACIÓN Y MONTAJE DE INSTRUMENTOS

3.1 Identificación del problema

En equipos industriales de refrigeración la información emitida por los constructores solo abarca las condiciones de eficiencia de los instrumentos por separado. Como es el caso del equipo de refrigeración chiller la eficiencia del el sistema no solo depende de la unidad condensadora sino también el equipo de bombeo y el equipo de extracción de calor, la información del comportamiento integral del intercambio de calor del equipo completo es muy valiosa sobre todo en el análisis de los parámetros de diseño de tecnologías de refrigeración construidas en el país.

La necesidad de establecer parámetros de velocidades de enfriamiento en diferentes condiciones de operación del equipo chiller traducidas a graficas experimentales de temperatura y flujos de calor lleva a la automatización de la de adquisición de datos que pueda satisfacer esta necesidad, para esto se utilizan programas y dispositivos electrónicos que nos ayudan a simplificar este cometido. A continuación se detallan las alternativas de solución.

3.2 Alternativas de solución

La adquisición de datos se remite al registro de caudal y temperaturas necesarias en un análisis de flujo de calor, con este fin se necesitan sensores de flujo y temperaturas además de un actuador para la variación de caudal con su respectiva programación.

3.2.1 *Desarrollo del lenguaje de programación.* Se la logra con la integración del hardware y software mediante los cuales se pueden obtener diferentes señales dependiendo del sensor que se está utilizando.

LabVIEW es un lenguaje de programación gráfico en su totalidad, esto significa que utiliza una programación en bloques que se encuentran previamente programados, se lo utiliza en la instrumentación control y adquisición de datos. El proceso de la adquisición de datos comienza con el sensor el cual percibe la variable física ya sea este caudal, presión o temperatura para controlar el actuador.

Este a su vez emite una señal que puede ser digital o analógica dependiendo del tipo de sensor que se está utilizando y la transmite a la tarjeta de adquisición de datos donde la señal es acondicionada para que pueda ser procesada y almacenada como se muestra en la figura 13.

Con la información almacenada por la adquisición de datos mediante los sensores, se procede a la generación de reportes, estos recopilan los datos necesarios para poder presentarlos de forma clara, ordenada y precisa para que puedan ser interpretados por los usuarios del programa.



Fuente: http://www.sci.unal.edu.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292014000200005&lng=es&nrm=is

La ventaja de este tipo de adquisición de señales es facilidad del manejo de datos, el almacenamiento de los mismos y la posibilidad del manejo en tiempo real de las diferentes variables físicas que puedan ser censadas.

A continuación se detalla los diferentes tipos de instrumentos y tarjetas de procesamiento de señales que pueden ser usados para el proceso de adquisición de datos del equipo de refrigeración.

3.2.2 Tarjetas de procesamiento de señales NI-myDAQ. Para el procesamiento de señales se tiene un dispositivo de adquisición de datos (DAQ) compacto y portátil energizado por USB, es capaz de medir y analizar señales en cualquier lugar. Tiene la capacidad de trabajar con señales analógicas y digitales, además cuenta con un contador de pulsos interno.

- Dentro de las características tenemos las siguientes:
- Consta con ocho instrumentos de laboratorio plug-and-play basados en PC.
- Multímetro digital (DMM) y osciloscopio y generador de función.

- Motor de adquisición de datos para medir dos canales diferenciales de entrada analógica y salida analógica (200 kS/s, 16 bits, ± 10 V).
- Ocho líneas, entrada digital y salida digital (compatible con TTI de 3.3 V TTL).
- Salidas de suministro de potencia +5 V, +15 V y -15 V (hasta 500 mV de potencia).
- El DMM aislado de 60 V puede medir voltaje y corriente AC y DC, así como resistencia, voltaje de diodo y continuidad.

Figura 14. Tarjeta de adquisición NI myDAQ



Fuente: http://sine.ni.com/gallery/app/ui/page?nodeId=210929&mTitle=Dispositivo%20NI%20myDAQ&mGallery=set_mydaq

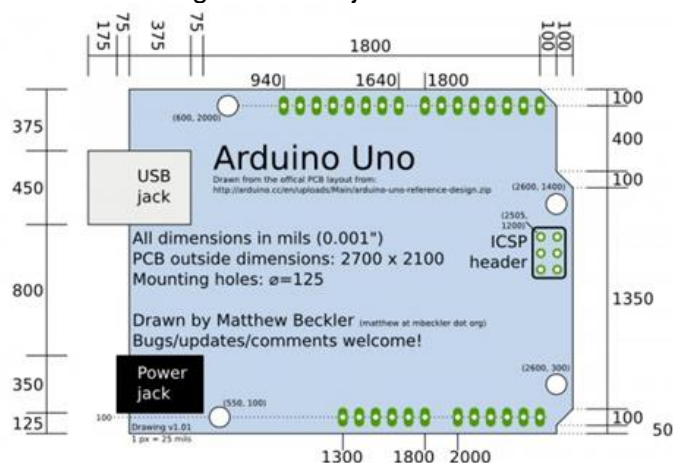
3.2.2.1 Tarjeta arduino. Es una tarjeta de adquisición y control de software libre, con ella se consigue hacer una tarjeta de adquisición mucho más económica. Todo esto gracias a la comunicación de datos NI LabVIEW y el firmware correspondiente que convierte a la tarjeta arduino en una placa para adquisición de datos.

Requisitos:

- Arduino, controlador ATMEGA328 o superior.
- IDE de arduino.
- Kit de drivers Visa.
- LabVIEW Interface para arduino.

Mediante la utilización de los requisitos anteriormente mencionados se logra tener una tarjeta de adquisición que pueda comunicarse con LabVIEW.

Figura 15. Tarjeta Arduino



Fuente: <http://www.electronicosonline.com/wp-content/uploads/2011/12/315.jpg>

Su uso es amplio en diferentes campos de estudio y su aplicación en la industria se aplica con cierta moderación, estando su aplicación aun en desarrollo para ser considerado como instrumento de control industrial. La principal dificultad que presenta esta tarjeta arduino es el control de corrientes parasitas que entorpecen la programación y por tanto el proceso industrial.

3.2.3 Control para la adquisición del flujo másico del cloruro de calcio. Una de las variables de proceso más importante y comúnmente medidas en la industria es el flujo, este puede presentarse en diferentes formas y ser medido en diferentes unidades. El flujo puede presentarse como líquido, gases o vapor y puede contener o no contaminantes ya que se han desarrollado factores de corrección para una estimación más calibrada dependiendo del tipo de sensor.

Uno de los parámetros más importantes al momento de seleccionar un instrumento para censar de flujo son las condiciones en que se encuentra el fluido tomando en cuenta su temperatura, presión, densidad, viscosidad, pureza, etc. Estos medidores de flujo se dividen en flujómetros volumétricos, de velocidad, de energía cinética y de masa.

3.2.3.1 Flujómetros tipo paleta. Este sensor funciona mediante la medición del volumen y la velocidad del flujo que se encuentra en la tubería. Su presentación es variada en función del tipo de señal de salida por lo general senoidal y cuadrática. Tiene imanes permanentes en las paletas del rotor el mismo que se mueve cuando el fluido lo atraviesa enviando una señal de onda que es proporcional a la velocidad del flujo, el acondicionamiento de señal depende del tipo de sensor.

Figura 16. Sensor tipo paleta



Fuente:http://www.coleparmer.com/Product/GF_Signet_Rotor_X_High_Flow_Sensor_for_1_2_to_4_Pipe_PP_Body_Titanium_Shaft/EW-05618-10

El sensor de flujo tipo paleta GF-515 funciona midiendo la cantidad de pulsos por revolución con una entrega de señal tipo senoidal, la misma que requiere un acondicionamiento extra para ser digitalizada. Entre sus principales características tenemos las siguientes:

- Cuerpo del sensor de polipropileno relleno de vidrio.
- Resistente a fluidos volátiles incluidos algunos ácidos.
- Temperatura de funcionamiento de -18 °C a 20 °C.
- Fácil desmontaje sin necesidad de herramientas.
- Señal de onda senoidal.
- Juntas tóricas.
- Pasador de titanio.
- Velocidad de flujo de 0,3 a 6 m/s.
- Presión de 14 bar max.
- Resistente a la corrosión.

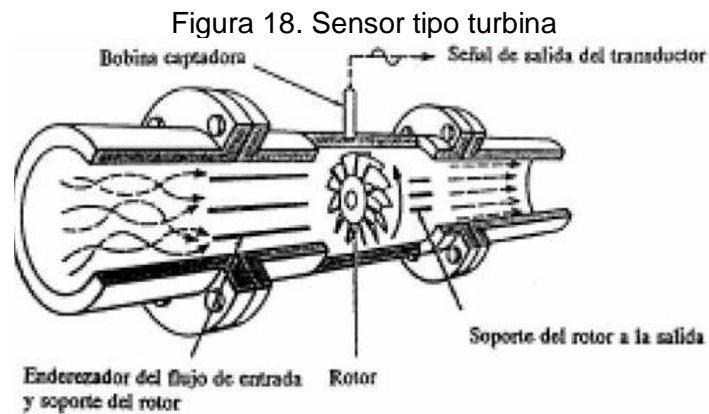
Figura 17. Sensor de flujo GF-515



Fuente: Autores

3.2.3.2 *Flujómetros tipo turbina.* Consiste en un rotor multi-cuchilla que se suspende sobre cojinetes que le permite girar libremente en la corriente de fluido. Las cuchillas son impactadas por el fluido produciendo que el rotor gire a una velocidad que es directamente proporcional al caudal.

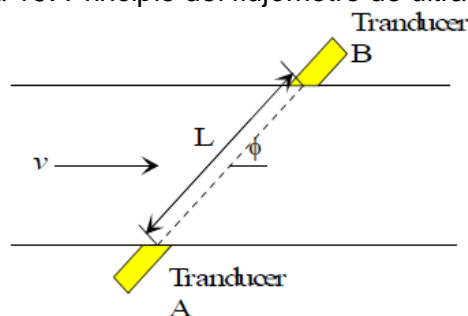
La velocidad de rotación se la puede censar de dos formas siendo esta, rotación mecánica por engranes acoplados al rotor y óptica por un rayo de luz que es interrumpido por las cuchillas como un opto acoplador. Una de sus características principales son su gran exactitud y repetitividad, pero su gran defecto es que necesita de calibración constante y no puede trabajar con fluidos muy viscosos o que estén contaminados.



Fuente: <http://www.industriaynegocios.cl/Académicos>

3.2.3.3 *Flujómetro de ultrasonido de tiempo de tránsito.* Este sensor se lo usa para determinar de manera rápida el caudal que pasa por una tubería, el principio de funcionamiento de este tipo de sensor se basa en la medición de onda de ultrasonido y queda determinando el tiempo de ida y retorno de la onda, la diferencia de este tiempo se traduce como la velocidad del flujo y a su vez el flujo que está atravesando la tubería.

Figura 19. Principio del flujómetro de ultrasonido



Fuente: <http://educaciones.cubaeduca.cu/medias/pdf/2454.pdf>

A continuación se enumera algunas de sus ventajas y desventajas que pueden prestar este tipo de sensores:

- Fácil de instalar o sujetar a la línea.
- No es invasivo.
- No existe pérdida de presión.
- No se afecta por la presión, temperatura o densidad del fluido.
- Se lo usa tanto para líquidos como para gases.
- Los líquidos no deben contener sólidos en suspensión o burbujas.
- Tienen una exactitud que va desde $\pm 1\%$ hasta $\pm 2,5\%$ de la razón.
- Salida lineal.
- Existen diseños bidireccionales.

3.2.4 Control para la adquisición de temperatura. Dentro de los diversos procesos de las industrias químicas, farmacéuticas, hidroeléctricas, cerámico, etc. El manejo de la variable de temperatura es muy importante al momento de obtener un producto final específico.

Es por eso que es una de las variables más utilizadas en la industria para diferentes procesos, sin embargo existen varios criterios que se tiene que tener en cuenta al momento de seleccionar un sensor de temperatura entre los cuales tenemos exactitud requerida, su rango de medición, tiempo de respuesta, ambiente de trabajo, alcance, error, sensibilidad, confiabilidad, linealidad, etc.

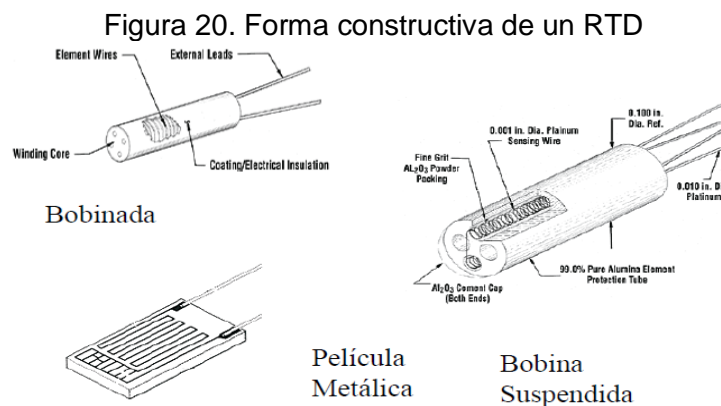
3.2.4.1 Sensores de temperatura. Este tipo de sensores son dispositivos que emiten una señal eléctrica que es proporcional al cambio de temperatura, entre los principales sensores de temperatura tenemos los RTDs, termopares y termistores NTCs.

3.2.4.2 Sensor de temperatura RTD. Es un detector de temperatura resistivo, esto quiere decir que varía la resistencia del material con la temperatura indicando una variación lineal que a medida que aumenta la temperatura lo hace también la resistencia, utiliza generalmente un puente rectificador para su calibración. Entre sus principales propiedades podemos mencionar:

- Son maleables.
- Resistentes a la corrosión.

- Curva de transferencia estable y repetitiva
- Variación lineal de la resistencia con la temperatura.
- Tienen un costo relativamente bajo.
- Son lineales y estables.

El material de estos sensores comúnmente utilizados para su fabricación son platino, cobre, níquel, molibdeno y níquel-hierro debido a su alta sensibilidad térmica, en la figura 20 se muestra estos metales con su rango de temperatura y su coeficiente de temperatura promedio.



Fuente: http://globosatiie.googlecode.com/svn/trunk/globosatiie/CD%20del%20proyecto/Sensores%20de%20temperatura%20externa/PDFs/2009_RTDT%5B1%5D.pdf

Tabla 3. Metales usados para los RTDs

Metal	Rango de temperatura		Alpha	Comentarios
Cobre	Cu	-200 °C a 260 °C	0,00427	Bajo costo
Molibdeno	Mo	-200 °C a 200 °C	0,00300 0,00385	Bajo costo, alternativa del platino en rangos bajos de temperatura
Níquel	Ni	-80 °C a 260 °C	0,00672	Bajo costo, rango limitado de temperatura
Níquel – Hierro	Ni - Fe	-200 °C a 200 °C	0,00518	Bajo costo
Platino	Pt	-240 °C a 660 °C	0,00385 0,00392 0,00377	Buena precisión, es posible extender el rango de temperatura a 1 000 °C

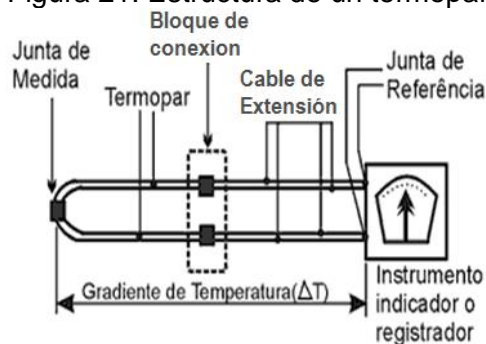
Fuente: http://globosatiie.googlecode.com/svn/trunk/globosatiie/CD%20del%20proyecto/Sensores%20de%20temperatura%20externa/PDFs/2009_RTDT%5B1%5D.pdf

3.2.4.3 Termopares. Este tipo de sensores se basan en el efecto termoeléctrico, se los construye a partir de dos metales diferentes que se unen en dos juntas diferentes. El material termoeléctrico del que están fabricados permite transformar el calor en electricidad. El termopar genera un voltaje que es proporcional al cambio de

temperatura al que está sometido, de esta manera se puede saber la temperatura deseada para cualquier proceso industrial. Estos sensores están conformados por la combinación de distintos tipos de metales, así cada uno de ellos tiene diferente tipo de aplicación y rango de la temperatura que se desea censar en el entorno de trabajo, entre los más comunes tenemos los de tipo J, K, E y B. El tipo de sensor a elegir entre las gamas que se mencionaron anteriormente debe tenerse muy en cuenta el rango de operación y el ambiente de trabajo ya sea por gran diferencia de temperatura o ambiente corrosivo.

Dentro de sus ventajas tenemos que son de bajo costo, robustos, tienen un amplio rango de temperatura, buena exactitud, buena repetitividad y baja inercia térmica. Por lo contrario su desventaja es que necesita de una temperatura de referencia y tiene una baja sensibilidad con un valor menor a los $60 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Figura 21. Estructura de un termopar



Fuente: <https://elementosqf.files.wordpress.com/2007/11/circuito.gif>

3.2.4.4 Termistores. Este tipo de sensor se basa en el cambio de la resistencia del semiconductor al variar la temperatura. Se los fabrica con óxidos de diversos metales como cobalto, cobre, magnesio, titanio, níquel, etc. Los termistores se clasifican en dos grupos, los primeros son los NTC estos disminuyen la resistencia cuando hay aumento de temperatura y los termistores PTC. Los mismos que aumentan la resistencia al aumentar la temperatura, su designación en general es por la resistencia de referencia a la temperatura.

3.2.4.5 Termistor NTC. Es un tipo de sensor no lineal, su comportamiento responde a una ecuación exponencial cuyas constantes deben tener un gran grado de calibración para el correcto funcionamiento, la mayor parte de su utilización se lo realiza en procesos industriales, se encuentran controladores especialmente acondicionados para este tipo de sensores debido a su meticulosa calibración y son de gran preferencia para procesos a bajas temperaturas.

Figura 22. Termistor NTC



Fuente: <http://www.fullgauge.com/es/productos-roller-bag-sb19-sensor>

3.2.5 *Control para modificar el caudal de descarga del cloruro de calcio.* Los actuadores son parte fundamental en el diseño de un sistema de control, este proyecto consta de un servomotor acoplado a una llave de paso para regular el caudal que es un parámetro determinante en el sistema. Es necesario evaluar las especificaciones técnicas para seleccionar el que mejor se adapte a los requerimientos debido a la referencia de torque e intensidad de corriente.

3.2.5.1 *Servomotor.* Un servomotor es un motor eléctrico de corriente directa DC con un juego de tren de engranajes para reducir la velocidad y aumentar el torque por la ley de conservación de potencia entre la línea de ejes, un potenciómetro conectado al eje de salida permite determinar la posición angular debido a la variación de resistencia por campo magnético sin afectar el torque nominal del mismo y un pequeño circuito electrónico permite el control de velocidad y sentido de giro por medio de un controlador de anchos de pulso de la señal de onda oscilativa, este controlador denominado PWM es un factor necesario para el control electrónico de todo sistema automatizado . La calibración de giro es por diferencia potencial de resistencia eléctrica.

Esta clase de motores cuentan con un control proporcional entre la velocidad y la distancia angular. Si la distancia angular es pequeña, la velocidad angular es baja y si la distancia angular es grande, la velocidad angular es alta. En la siguiente tabla se especifica las características del servomotor necesarias para la correcta instalación del mismo.

Figura 23. Servomotor DC



Fuente: <https://www.pololu.com/product/1390>

Tabla 4. Especificaciones del servomotor

Características	Especificaciones
Sistema de control	Control por ancho de pulso
Voltaje de pulsos requerido	De 3 a 5 V de una señal PWM
Tipo de motor	3 polos
Rango de temperatura de operación	-20 °C a +60 °C
Rango de voltaje de operación	De 4.8 V a 12 V
Velocidad de operación	90° en 1,5 s
Torque	115 kg-cm
Corriente de consumo	3 A
Corriente máxima	3,5 A
Rotación	270°
Ancho de pulso	600 – 2400 μs
Dirección	Sentido horario
Longitud de cable del conector	30 cm
Dimensiones	5,5 plg x 2,4 plg x 4,6 plg
Peso	1,15 kg

Fuente: Autores.

3.2.5.2 Electroválvula. Una electroválvula llamada también válvula solenoide es un dispositivo que impide o permite el paso del flujo de un fluido, el mecanismo de apertura y cierre de esta válvula funciona mediante la manipulación de un campo magnético generado por una bobina el mismo que atrae al émbolo de la válvula para el control de cambio de flujo o caudal de suministro. Son costosas y necesitan de buen mantenimiento tanto mecánico como eléctrico.

3.2.5.3 Variador de frecuencia. Conocidos también como variadores de velocidad de rotación en dispositivos controladores que se valen de la manipulación de la frecuencia de corriente alterna para variar la potencia de máquinas motoras de inducción, su aplicación se limita a sistemas trifásicos de corriente debido a la manipulación de grandes potencias de control.

3.3 Selección de la mejor alternativa para la adquisición de señales

Para el procesamiento de datos y señales los diferentes instrumentos son seleccionados en base al método cualitativo por puntos, ponderados con sus factores correspondientes en una calificación de 1 al 10, siendo una la menor calificación y 10 la máxima. Los factores evaluados son la precisión (P), costo (C), facilidad de instalación (FI), facilidad de adquisición (FA), ambiente de trabajo (AT).

Tabla 5. Especificaciones para selección del sensor de flujo

Sensores		Tipo paleta		Tipo turbina		Ultrasónico	
Factor	Peso	Calific.	Pond.	Calific.	Pond.	Calific.	Pond.
P	30%	9	2,7	9	2,7	10	3,0
C	20%	6	1,2	5	1,0	4	0,8
FI	10%	9	0,9	6	0,6	5	0,5
FA	20%	6	1,2	4	0,8	5	1,0
AT	20%	9	1,8	9	1,8	10	2,0
Total	100%		7,8		6,9		7,3

Fuente: Autores.

El sensor de mayor conveniencia es el tipo paleta, el acondicionamiento de la señal de adquisición se detalla más adelante.

Tabla 6. Especificaciones para selección del sensor de temperatura

Sensores		RTD		Termopar		NTC	
Factor	Peso	Calific.	Pond.	Calific.	Pond.	Calific.	Pond.
P	30%	9	2,7	9	2,7	9	2,7
C	20%	9	1,8	5	1,0	7	1,4
FI	10%	7	0,7	6	0,6	9	0,9
FA	20%	8	1,6	4	0,8	9	1,8
AT	20%	9	1,8	9	1,8	10	2,0
Total	100%		8,6		6,9		8,8

Fuente: Autores.

Para la adquisición de temperatura la mejor opción es una NTC, debe tenerse un especial cuidado con la calibración del sensor debido a que su control solo depende de una ecuación exponencial en función del voltaje, su acondicionamiento se detalla.

Tabla 7. Especificaciones para selección del actuador del control de caudal

Actuadores		Servomotor		Electroválvula		Frecuencímetro	
Factor	Peso	Calific.	Pond.	Calific.	Pond.	Calific.	Pond.
P	30%	9	2,7	10	3,0	10	3,0
C	20%	8	1,6	5	1,0	4	0,8
FI	10%	9	0,9	7	0,7	5	0,5
FA	20%	8	1,6	5	1,0	7	1,4
AT	20%	9	1,8	9	1,8	10	2,0
Total	100%		8,6		7,5		7,7

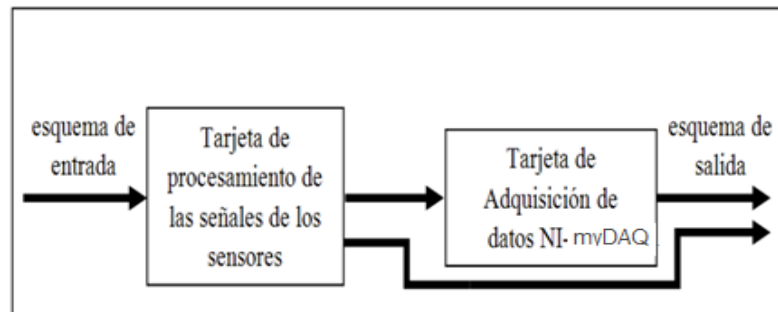
Fuente: Autores.

Para el control de la variación de caudal es mejor utilizar un servomotor de alto torque porque además es común que en la válvula a la que será acoplado queden restos de salmuera en base de cloruro de calcio por lo que tiende a atascarse un poco.

3.4 Acondicionamiento de señales

Para que los sensores se puedan conectar a la NI myDAQ es necesario acondicionar las señales de los diferentes sensores del sistema, como es el caso del sensor de caudal que entrega una señal de frecuencia analógica de bajo voltaje y el sensor de temperatura.

Figura 24. Esquema de adquisición de datos



Fuente: Autores

Antes de ingresar las señales a la tarjeta de adquisición NI-myDAQ cada una debe ser acondicionada según los parámetros de funcionamiento analizados para cada sensor y actuador.

3.4.1 *Acondicionamiento de señal para sensor de temperatura NTC.* El circuito de amplificación incluye una resistencia que cumple la función de divisor de voltaje para que el sensor NTC funcione como una resistencia variable, la variación del mismo no es lineal sino que su comportamiento responde a una ecuación exponencial de voltaje al cambio de resistencia como variación de temperatura de referencia y cumple con la siguiente fórmula.

$$R_T = R_o e^{\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right]} \quad (13)$$

Dónde:

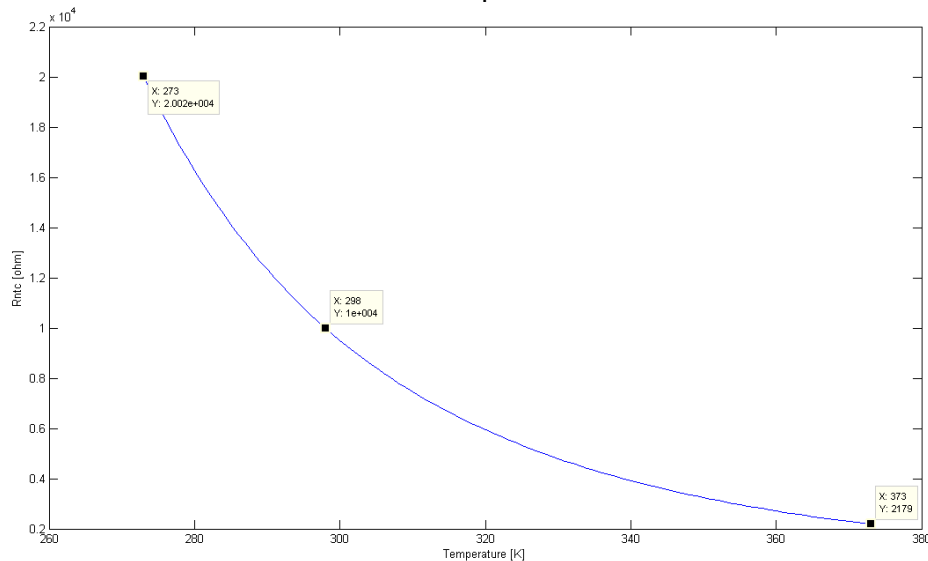
R_T = Valor de la resistencia a la temperatura T [K]

R_o = Valor de la resistencia a la temperatura T_o [K]

β = Constante beta característica de las NTC
 T_0 = Temperatura de referencia [K]
 T = Temperatura a medir [K]

En la figura 25 se muestra la curva característica de la NTC para los diferentes valores de resistencia a temperatura de referencia.

Figura 25. Curva característica de la NTC para los diferentes valores de resistencia



Fuente: https://xmsousa.files.wordpress.com/2010/08/ntc_curve.png

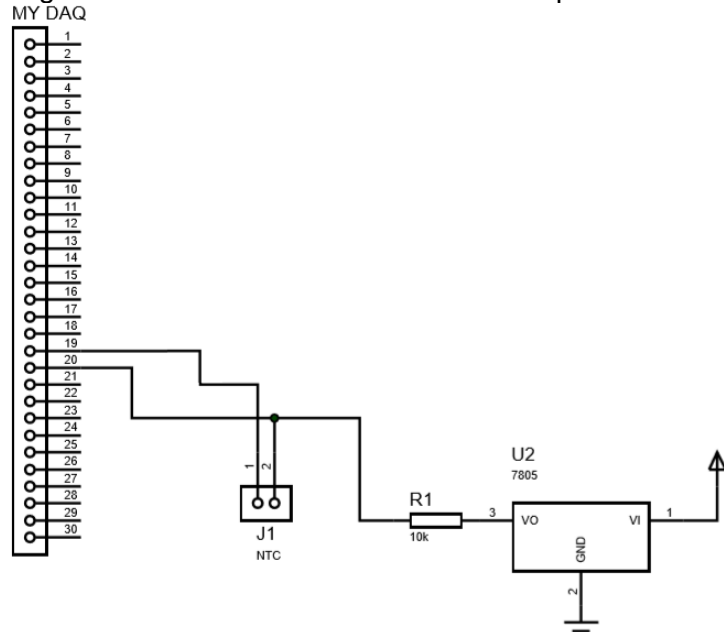
Valiéndose de un divisor de voltaje se calcula la resistencia R_T y se puede despejar la temperatura a medir T de la ecuación (13). Entonces se obtiene la ecuación (14) despejada que será utilizada en el bloque de programación de para la NI-myDAQ en el software de control LabVIEW.

$$T = \frac{B}{\ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right) + \frac{B}{T_0}} \quad (14)$$

Para afinar el valor de la constante B que depende del material característico de la NTC (que fluctúa entre 2 000 y 4 000 de resistencia) fue necesario el controlador de temperatura Gauge MT512ri plus instalado anteriormente en el equipo para tener una temperatura de referencia.

Una vez hallada la temperatura a medir con la ecuación despejada anteriormente queda calcular la resistencia del divisor de voltaje, para esto tomamos en cuenta el voltaje de la entrada analógica de la NI-myDAQ para tener la equivalencia de cada bit de señal de la conversión analógico-digital.

Figura 26. Circuito de acondicionamiento para la NTC



Fuente: Autores

La ecuación para un voltaje de referencia de 5 voltios a relación de bit de transferencia de datos sería la siguiente:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1024} \times \text{Lectura de entrada analógica} \quad (15)$$

Dónde:

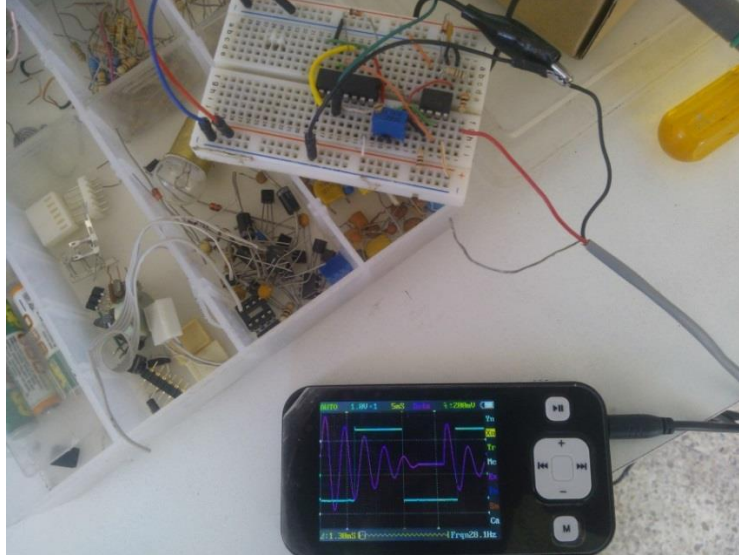
V_{out} = Voltaje de la entrada analógica de la NI-myDAQ [v]

V_{in} = Voltaje referente a la temperatura a medir [v]

La ecuación anterior se usa solo para un voltaje estable de 5 voltios pero en la adquisición experimental es común encontrar mucho ruido en las señales y el valor de 1024 bits es muy variable afectando a la ecuación exponencial de temperatura. En vista del inconveniente anterior razón se usa la misma salida de voltaje analógica de la NI-myDAQ mediante un puente y acondicionando el bloque de programación en LabVIEW.

3.4.2 *Acondicionamiento de señal para sensor de flujo.* El sensor de caudal instalado entrega una onda senoidal que varía la frecuencia de respuesta en función del caudal censado y esta es de amplitud constante, por esta razón es necesario convertir la onda senoidal de frecuencia en cuadrática para que sea leída por el contador de pulsos de la tarjeta de adquisición NI-myDAQ.

Figura 27. Circuito para la conversión de onda senoidal del sensor de flujo



Fuente: Autores

En la primera etapa la señal se inyecta a un filtro para minimizar los efectos del ruido eléctrico, R8, R10, D1 y C4 se atenúan y rectifican la señal. El opam LM358 U3:A esta configurado como seguidor de volate para acoplar las impedancias entre el sensor y el circuito de acondicionamiento.

Para evitar cualquier error de medición la corriente debe limitarse a 2 mA. Es posible ajustar la ganancia del opam a través de las resistencias R8 y R10 para garantizar la linealidad del amplificador, la cual se determina por la siguiente ecuación

$$G = 1 + \frac{R8}{R10} \quad (16)$$

Dónde:

G = Ganancia

R8 = Resistencia de entrada [kΩ]

R10 = Resistencia de retroalimentación [kΩ]

Remplazando tenemos:

$$G = 1 + \frac{30k}{18k}$$

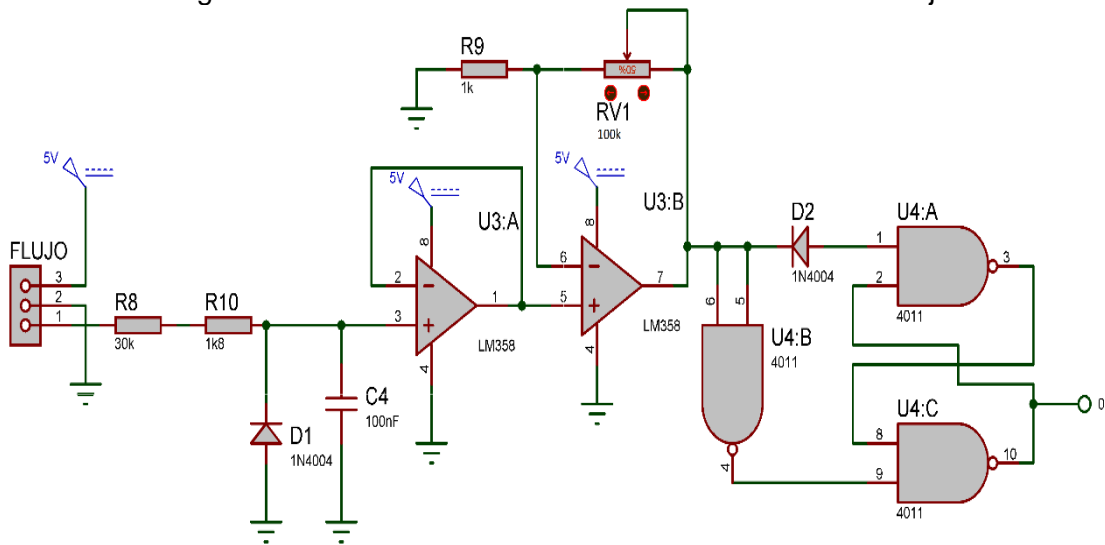
$$G = 3$$

El opam LM358 U3B está configurado como amplificador no inversor, la ganancia es variable mediante el potenciómetro y obedece a la ecuación (16), por tal razón la máxima ganancia que va a tener la señal es de 100.

Por cuestiones de pérdidas internas en los elementos electrónicos no se va a alcanzar los 5 V que se necesita para la NI-myDAQ, razón por la cual se incorpora el integrado 4011 que trabaja con tecnología TTL que entrega pulsos cuadrados de 5 V en gran parte estables.

En la figura 38 se muestra la disposición de estos elementos que ayudan a la rectificación de la señal para que la myDAQ pueda adquirir los datos de caudal. La tarjeta de adquisición dispone de un contador de pulsos de frecuencia que con el cambio de onda puede ser leída por la misma. Los datos serán manejados en la programación de bloques del sistema en lenguaje gráfico G teniendo en cuenta que se debe calibrar los resultados por cambio de densidad de la composición de solución y temperatura.

Figura 28. Circuito de acondicionamiento del sensor de flujo



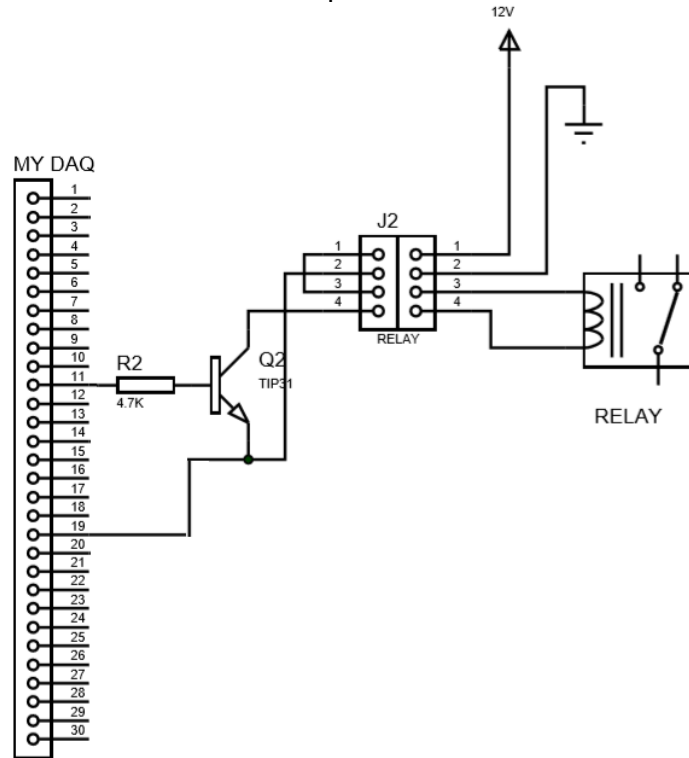
Fuente: Autores

El Sensor de flujo tipo paleta GF-515 tiene un factor K usado para convertir el número de pulsos generados en el sensor cuando atraviesa el fluido por las paletas del mismo a litros dependiendo del diámetro de tubería.

Para este caso de estudio se utiliza una tubería de 3/4 plg y un anclaje para el sensor MPV8T007, dicho factor de corrección es de 78,61 tal como se muestra en el anexo A: "Factores corrección K pulsos por unidad de líquido".

3.4.3 Acondicionamiento para el mando automatizado. Con el fin de tener un control automatizado y uno manual se realizaron los debidos ajustes en el sistema de mando eléctrico como en el hidráulico que se detallara en el cambio operacional del equipo en el capítulo siguiente.

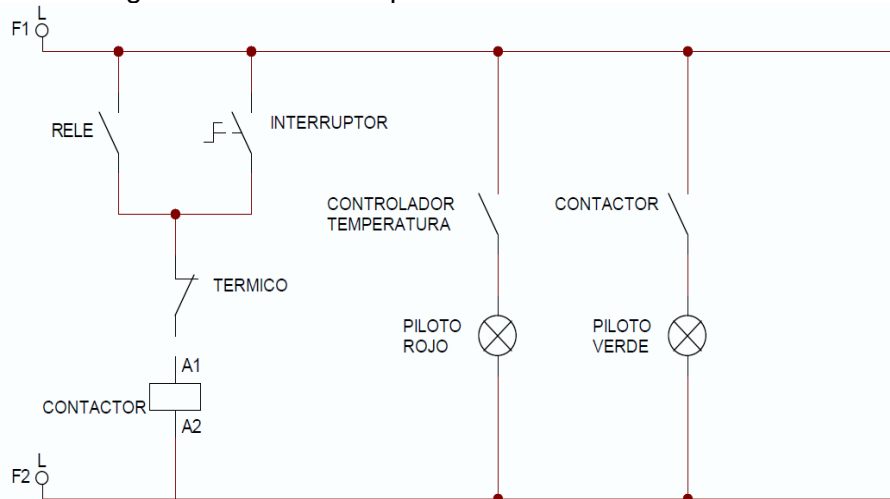
Figura 29. Circuito de control para el accionamiento del sistema



Fuente: Autores

Para el correcto funcionamiento del equipo se realiza el siguiente circuito de potencia acondicionado para el control en paralelo con el mando automatizado.

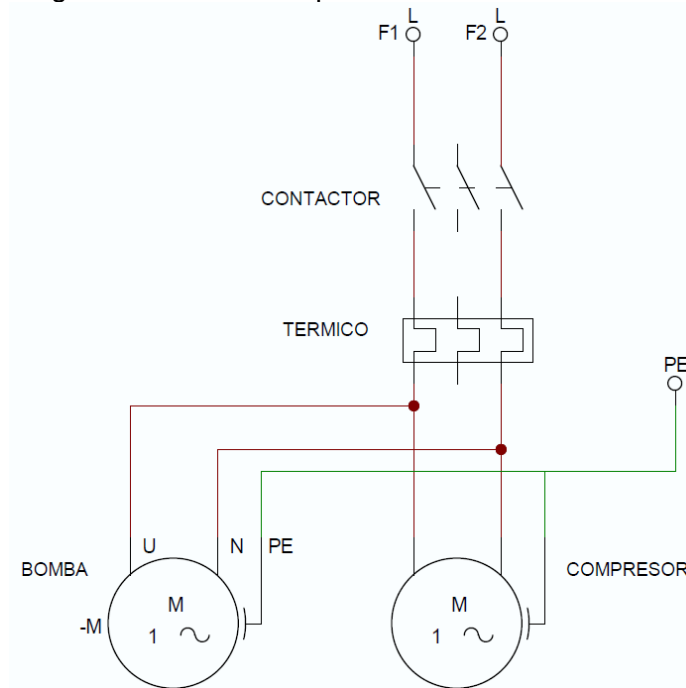
Figura 30. Circuito de potencia de la línea monofásica



Fuente: Autores

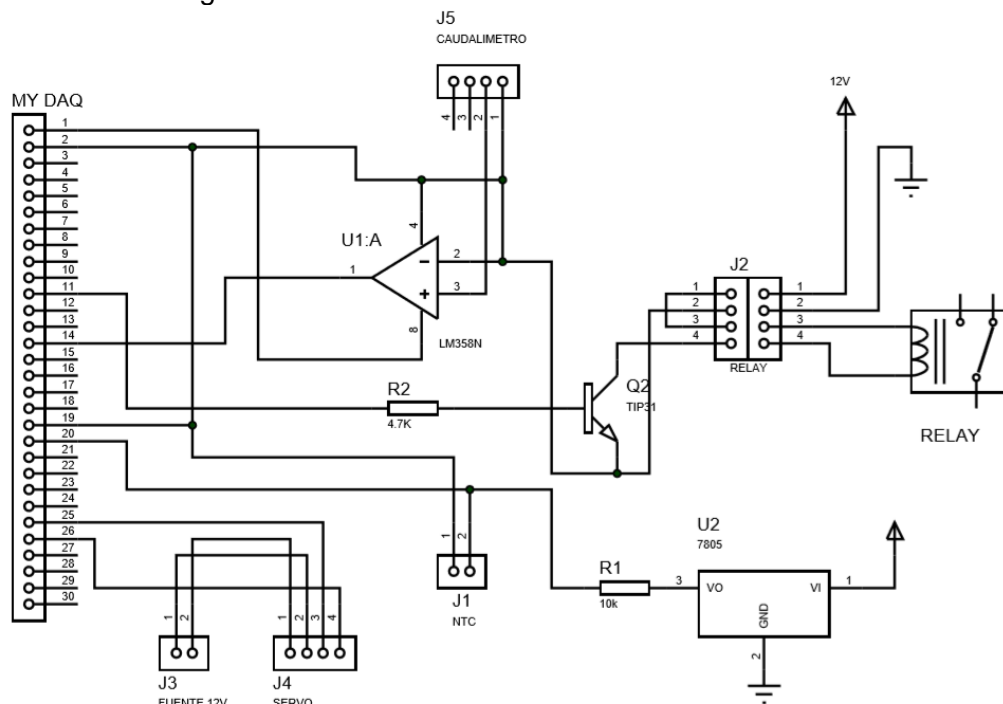
Para el mando automatizado se realiza un control en paralelo accionado por un relé de estado sólido que es activado desde la plataforma virtual del control programado en LabVIEW. El diagrama de control así como el de potencia se indican en las siguientes figuras.

Figura 31. Circuito de potencia de la línea trifásica



Fuente: Autores

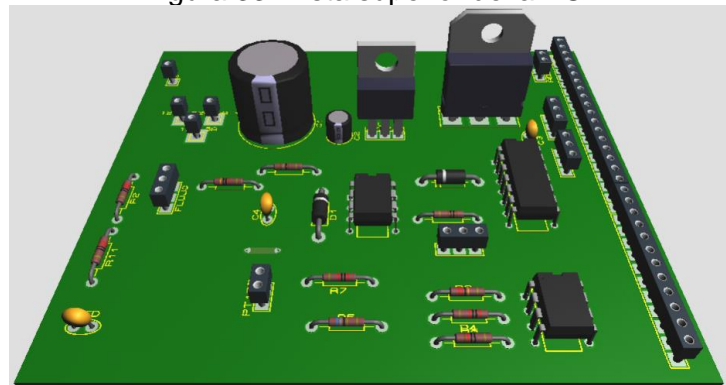
Figura 32. Diseño de circuito de control de señales



Fuente: Autores

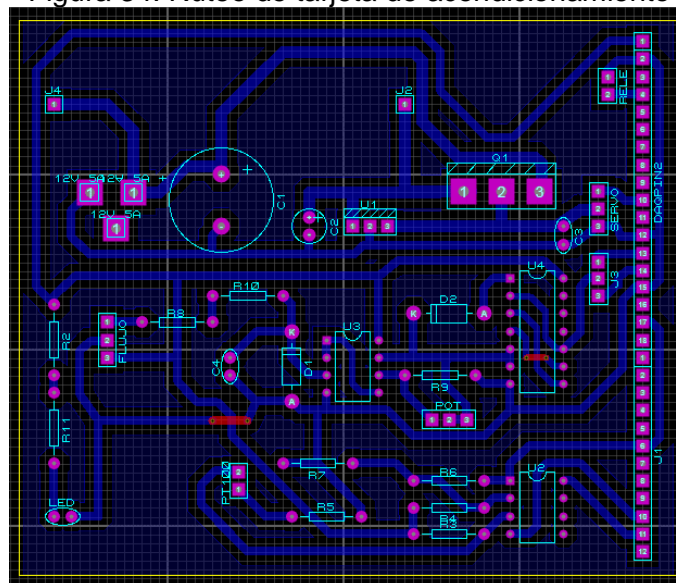
3.4.4 *Diseño de la tarjeta PCB.* El diseño de la tarjeta de circuito impreso PCB se realiza en la aplicación Proteus 8.0 Profesional, donde se realiza la simulación, identificación y conexión de los elementos para el circuito de acondicionamiento de señales, la fuente del servomotor. Se utiliza el proceso de transferencia térmica para trasladar el diseño impreso en papel termo-sensible a la baquelita normal.

Figura 33. Vista superior de la PCB



Fuente: Autores

Figura 34. Ruteo de tarjeta de acondicionamiento



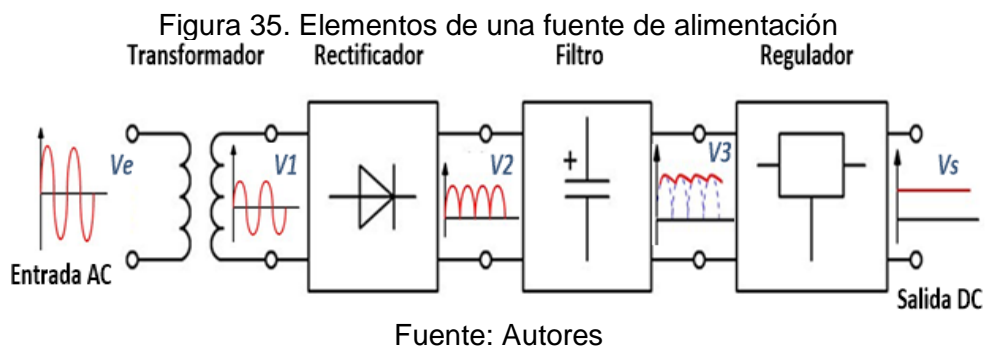
Fuente: Autores

3.5 Fuente de alimentación DC

Una fuente de alimentación DC proporciona una tensión constante en el tiempo y lo más estable posible, si la generación se basa en una tensión alterna, la salida presenta un rizado sobre el nivel de continua. En las fuentes de alimentación como una pila, un cargador, una fuente de alimentación de PC, etc. Existe limitación en la corriente máxima que proporciona la fuente a la carga.

Dentro de las características importantes de esta fuente:

- Provee un voltaje y corriente estable para el circuito de control y de más periféricos.
- Mediante reguladores de voltaje se obtiene diversos niveles de voltajes necesarios para este proyecto.
- Se tiene corriente de alto amperaje para ciertos elementos necesarios como el servomotor, que se ocuparán para en este proyecto.
- La capacidad de corriente de la fuente de alimentación debe ser igual o de preferencia superior a la totalidad de la suma de corrientes de las cargas conectadas.



Como es necesaria una fuente de alimentación externa con una corriente igual o superior a 3 A, y 12 V la cual es consumida por el servomotor para la apertura de la válvula, motivo por el cual se utilizó una fuente de 12 V y 5 A que está dentro de las necesidades del proyecto como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Fuente de 12 V y 5 A



Fuente: Autores

3.6 Evaluación del estado actual del chiller

El chiller funciona en conjunto con todas las partes anteriormente mencionados, en el tanque reservorio se llena un volumen determinado de 218 l de salmuera (CaCl_2 disuelto en agua) el cual será recirculado por la bomba centrífuga a través de las instalaciones hidráulicas. La unidad condensadora mediante la compresión del refrigerante absorbe gran cantidad de calor de la salmuera bajando así su temperatura en el intercambiador de calor de placas, una vez que se ha producido la transferencia de calor la salmuera vuelve al tanque reservorio a una temperatura menor de la que ingreso al inicio.

El funcionamiento del chiller se logra a través de un tablero de control, en él se encuentran todas las instalaciones eléctricas que permiten el normal funcionamiento del equipo, consta de un selector para el encendido y apagado del equipo, luces de encendido y apagado, y un termostato que indica la temperatura de la salmuera en el reservorio.

Figura 37. Chiller antes de la repotenciación



Fuente: Autores

3.6.1 Pruebas iniciales del chiller. Los datos obtenidos experimentalmente para la evaluación inicial se detallan a continuación.

3.6.1.1 Registro de la toma de datos experimentales para la evaluación inicial. Se realiza la prueba N°1 para la evaluación inicial del chiller: lunes, 23 de marzo del 2015.

- Hora de la prueba experimental: 09h10min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 16,4 \text{ }^\circ\text{C}$

- Volumen de recirculación de salmuera: 250 l

Prueba N°2 para la evaluación inicial del chiller: Martes, 24 de marzo del 2015.

- Hora de la prueba experimental: 09h20min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 250 l

Tabla 8. Resumen de la toma de datos

Prueba 1		Prueba 2	
Tiempo [min.]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Error relativo
0	16,40	16,40	0,00
5	15,20	15,00	1,49
10	13,60	13,40	1,33
15	12,00	11,80	0,93
20	10,60	10,40	1,92
25	9,10	8,60	4,96
30	7,70	7,20	6,94
35	6,20	5,80	6,90
40	5,10	4,60	9,21
45	3,70	3,20	15,63
50	2,50	2,10	17,92
55	1,30	1,10	1,33
60	-0,30	-0,10	1,33
65	-1,30	-1,00	1,49
70	-2,10	-1,70	4,96
75	-3,10	-2,60	16,13
80	-4,00	-3,30	17,50
85	-5,00	-4,30	14,00
90	-6,00	-5,10	15,00
95	-6,80	-5,90	13,24
100	-7,60	-6,90	9,21
105	-8,40	-7,60	9,52
110	-8,90	-8,60	3,37
115	-9,50	-9,60	-1,05

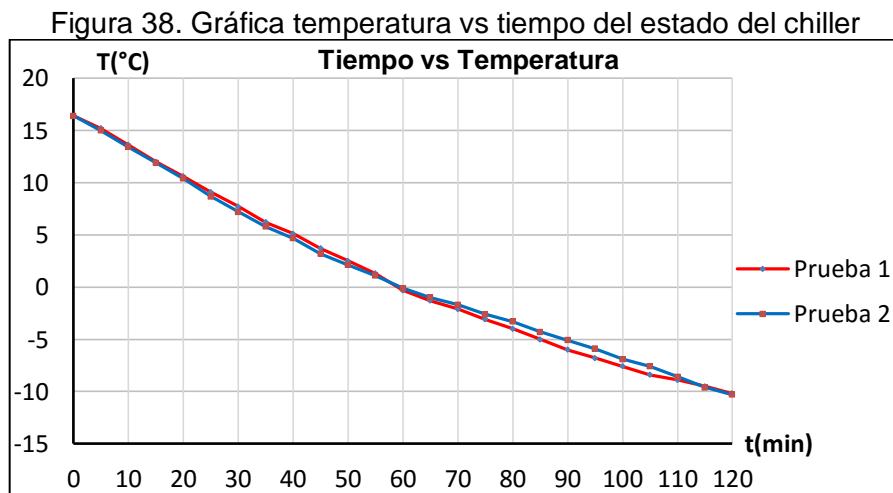
Fuente: Autores.

Uno de los problemas detectados al momento de encender el equipo fue la bomba.

La recirculación no se encontraba en funcionamiento, por lo que se tuvo que revisar las conexiones eléctricas y ajustar las terminales de los contactores del bobinado y del relé térmico.

Para la prueba del chiller no fue necesario realizar la mezcla del cloruro de calcio con agua, porque el tanque reservorio se encontraba cargado con salmuera. Se realizó dos pruebas para analizar los datos de temperatura y tiempo para estimar la diferencia con los publicados en el anterior trabajo obteniendo los siguientes resultados:

Para la construcción de las curvas de enfriamiento el resultado de las pruebas muestra la siguiente gráfica de comportamiento. Con el análisis de las velocidades de enfriamiento de las pruebas realizadas se nota un descenso respecto al funcionamiento del equipo en condiciones de diseño normales.



Fuente: Autores

Gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_{\text{inicial}} - T_{\text{final}} \quad (17)$$

Velocidad de enfriamiento:

$$V_{\text{enf.}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}} \quad (18)$$

Dónde:

ΔT = Gradiente de temperatura [°C]

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

t_{total} = Tiempo total de la prueba [min]

Tabla 9. Velocidades de enfriamiento respecto a las pruebas 1 y 2

Variables	Prueba 1	Prueba 2
Gradiente ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	26,60	26,59
t_{total} [min]	120,00	120,00
V_{enf} [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	0,22	0,22

Fuente: Autores

Se procede a la revisión del estado de carga del refrigerante. Además la dispersión de datos muestra resultados de errores sistemáticos más pronunciados en la zona de enfriamiento final razón por la cual debe tenerse cuidados en la toma de datos automatizada.

3.6.2 *Evaluación del estado de carga de refrigerante.* Una rápida evaluación de estado de carga de refrigerante del equipo es con la medición de corriente en la línea de trabajo.

Figura 39. Medición de corriente al arranque



Fuente: Autores

Resultados de la medición de corriente.

Tabla 10. Mediciones de corriente iniciales

Tipo de línea	Color del cable	Corriente [A]
Línea de arranque	Blanco	2,2
Línea de trabajo	Negro	6,1
Línea común	Rojo	8,3

Fuente: Autores

Figura 40. Carga de refrigerante



Fuente: Autores

3.6.3 *Análisis y evaluación de resultados después de la carga.* Una vez que se procede con la carga del refrigerante es necesario que se realice una nueva lectura de las corrientes. A continuación en la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de la medición de corrientes una vez cargado el refrigerante.

Tabla 11. Medición de corrientes finales

Tipo de línea	Color del cable	Corriente [A]
Línea de arranque	Blanco	3,1
Línea de trabajo	Rojo	6,8
Línea común	Negro	10,1

Fuente: Autores

3.6.4 *Evaluación final.* Se comienza con la medición de las presiones de alta y baja en tiempo real de funcionamiento obteniendo las gráficas siguientes.

Tabla 12. Presiones de alta y baja del equipo chiller

Tiempo [min]	P de baja [Psi]	P de alta [Psi]
0	40	40
10	45	180
20	50	220
30	50	225
40	50	225
50	50	225
60	50	225
70	50	225
80	50	225

Fuente: autores

La presión de arranque del sistema es de 40 psi manométricos en la línea de baja y se estabiliza después de los 10 minutos de funcionamiento hasta llegar a los 50 psi. Con los valores de las presiones del sistema tanto de alta como de baja se procede al cálculo de la relación de compresión, obteniendo los siguientes valores.

$$RC = \frac{P_{cond}}{P_{evap}} \quad (19)$$

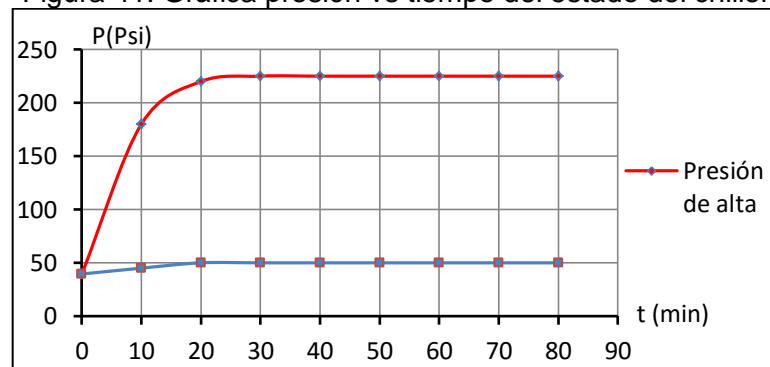
Dónde:

RC = Relación de compresión

P_{cond} = Presión de condensación [Pa]

P_{evap} = Presión de evaporación [Pa]

Figura 41. Gráfica presión vs tiempo del estado del chiller



Fuente: Autores

Con los valores de las presiones del sistema tanto de alta como de baja se procede al cálculo de la relación de compresión, obteniendo los siguientes valores.

$$RC = 1,734 \text{ MPa} / 0,424 \text{ MPa}$$

$$RC = 4,08$$

Este valor se encuentra dentro de los parámetros normales que se especifican en la norma de equipos de refrigeración y acondicionamiento de aire para procesos industriales (ASHRAE, 1990)

Ahora para establecer el coeficiente de rendimiento teórico COP se debe verificar la temperatura de entrada al compresor hermético y de la entrada a la válvula de expansión con ayuda de un pirómetro con el fin de ubicar los puntos termodinámicos de estos procesos en el diagrama presión – entalpia del refrigerante R-404A.

La temperatura registrada de la entrada al compresor es de $T_1 = 11\text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura de entrada a la válvula de expansión es de $T_3 = 31\text{ }^\circ\text{C}$.

Entonces:

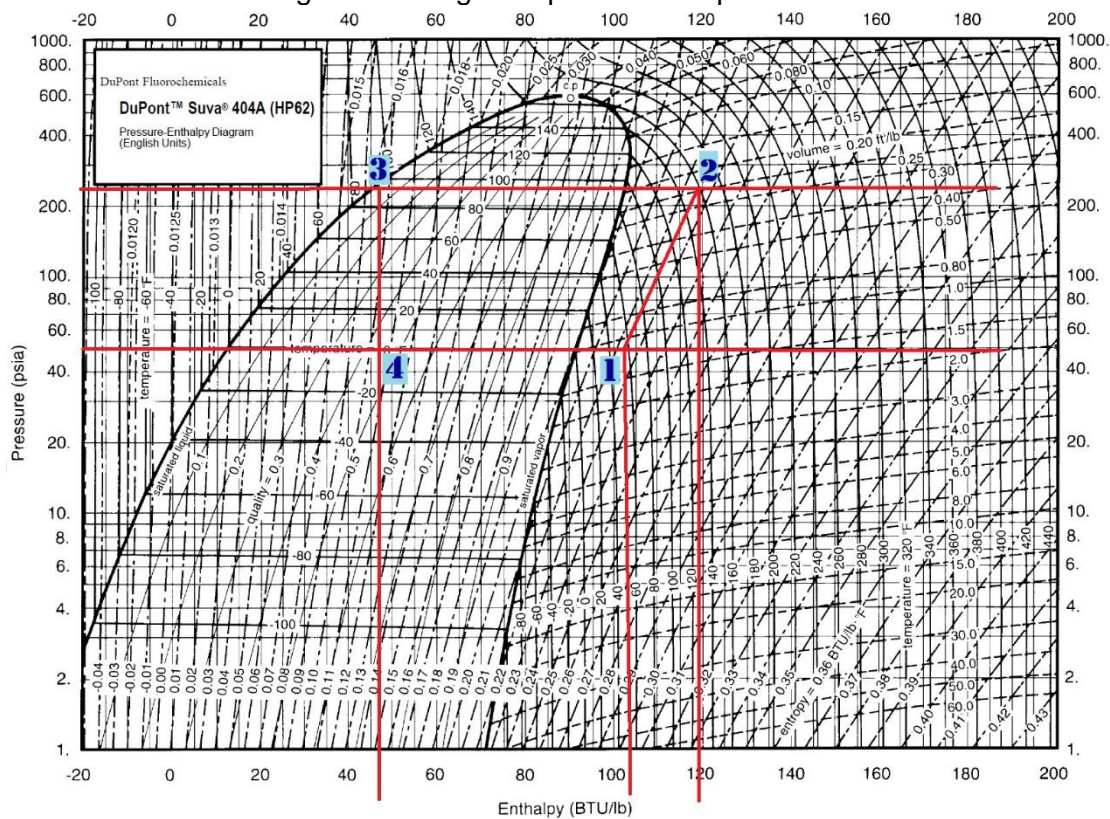
$$h_1 = 105\text{ BTU/lb}$$

$$h_2 = 120\text{ BTU/lb}$$

$$h_3 = 48\text{ BTU/lb}$$

$$h_4 = 48\text{ BTU/lb}$$

Figura 42. Diagrama presión-entalpía R-404A.



Fuente: Catálogo refrigerante SUVA R-404A DUPONT.

A continuación se calcula el coeficiente de rendimiento teórico calculado a partir del diagrama presión entalpía del refrigerante R404A ubicando los puntos termodinámicos para los procesos de compresión.

$$\text{COP}_{\text{Teórico}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (20)$$

$$\text{COP}_{\text{Teórico}} = \frac{(105 - 48)\text{BTU/lb}}{(120 - 105)\text{BTU/lb}}$$

$$\text{COP}_{\text{Teórico}} = 3,80$$

Ahora para una temperatura tope de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ circulando a través del intercambiador de calor tenemos

$$T_1 = -15\text{ }^{\circ}\text{C} = 258\text{ K}$$

$$T_2 = 34\text{ }^{\circ}\text{C} = 307\text{ K}$$

Coeficiente de rendimiento teórico de carnot.

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (21)$$

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = \frac{258\text{K}}{307\text{K} - 258\text{K}}$$

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = 5,26$$

Eficiencia frigorífica a partir de los coeficientes de rendimiento teórico.

$$\eta_{\text{frig}} = \frac{\text{COP}}{\text{COP}_{\text{Carnot}}} \quad (22)$$

$$\eta_{\text{frig}} = \frac{3,80}{5,26}$$

$$\eta_{\text{frig}} = 0,72$$

Se obtiene una eficiencia frigorífica del 72 % resultado a partir de los coeficientes teóricos de entalpías y de carnot.

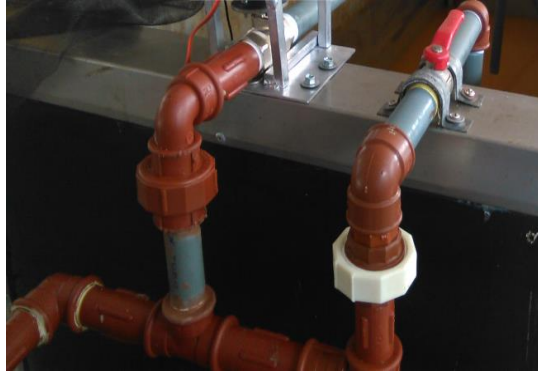
3.7 Montaje de equipos e instrumentos

Antes de realizar el montaje de los equipos e instrumentos es necesario que se realicen unas adecuaciones al chiller, dentro de las cuales están la instalación de soportes para la ubicación de tuberías y sensores, montaje de un bastidor para el servo motor, etc.

Una de las adecuaciones que se realiza en el chiller es la de la adaptación de una tubería de bypass conectada en paralelo a la tubería principal, debido a que este banco también se lo ocupa para la generación de hielo en bloques, para lo cual se

permite que se realice las pruebas de este equipo sin la necesidad de la utilización de adquisición de datos mediante los sensores y actuador para el control de la apertura de la válvula de globo y regulación del caudal para el servomotor de alto torque instalado. Se debe tener en cuenta la regulación y mantenimiento por corrosión.

Figura 43. Tubería en bypass



Fuente: Autores

3.7.1 *Montaje del sensor de temperatura.* El sensor de temperatura seleccionado es un termistor NTC, el cual varía su resistencia de acuerdo al cambio de temperatura, este incremento de temperatura no es lineal sino exponencial.

El sensor esta encapsulado en un recubrimiento de acero inoxidable esto debido a que el sensor va estar en contacto directo con el fluido de trabajo que es invasivo.

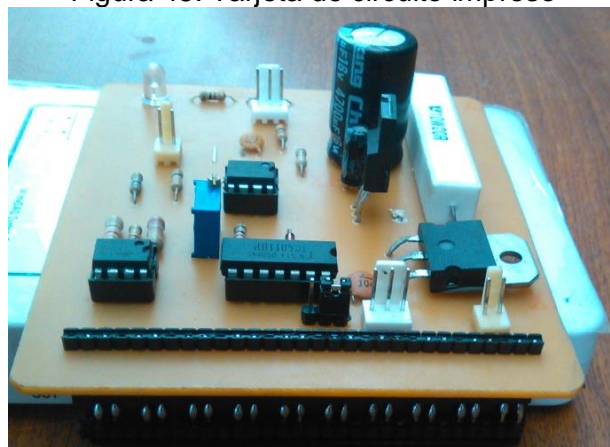
Figura 44. Termistor NTC



Fuente: Autores

Los cables del sensor de temperatura se los conecta a una tarjeta de circuito impreso adaptada a la myDAQ, esta permite acondicionar la señal entregada por el sensor para que pueda ser leída por la tarjeta de adquisición. El diseño del circuito de acondicionamiento se realiza en la aplicación Proteus 8.0 Profesional, aquí se hace la simulación, identificación y conexión de los elementos para el circuito.

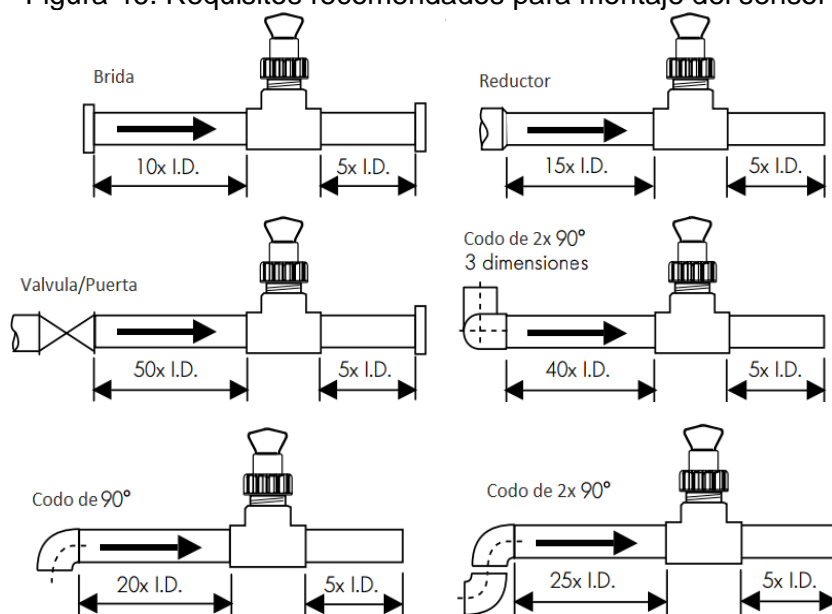
Figura 45. Tarjeta de circuito impreso



Fuente: Autores

3.7.2 Montaje del sensor de flujo. Para la instalación del sensor de flujo se debe tomar en cuenta las recomendaciones que da el fabricante para que el sensor funcione en óptimas condiciones, debe aplicar las distancias recomendados para la ubicación del sensor corriente arriba y corriente abajo.

Figura 46. Requisitos recomendados para montaje del sensor



Fuente: <http://www.reskem.com/pdf/gfsignet-5152536spec.pdf>

En este caso la ubicación del sensor de flujo se encuentra antes de una válvula las distancias necesarias aguas arriba y aguas debajo se calculan como se indica en la figura 46.

Para este caso aguas arriba de la corriente de flujo másico $50 \times ID$ y $5 \times ID$ aguas abajo, donde ID es el diámetro interior de la tubería datos obtenidos del datasheet del sensor.

$$50 \times 1,8 \text{ cm} = 90 \text{ cm}$$

$$5 \times 1,8 \text{ cm} = 9 \text{ cm}$$

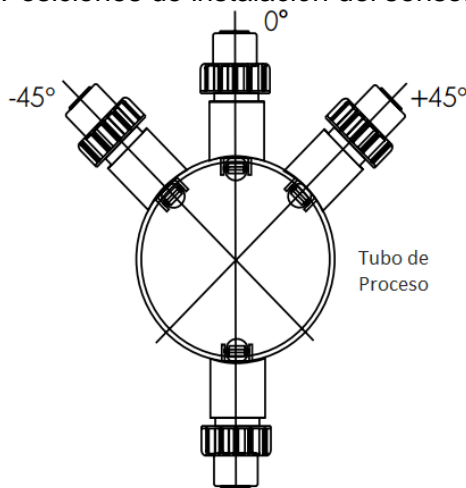
Con estas dimensiones se procedió a la instalación del sensor de flujo, estas distancias son recomendadas para mantener un flujo laminar necesario para un correcto funcionamiento del sensor de flujo.

3.7.3 *Posición del montaje del sensor de flujo.* A continuación se muestra las tres posiciones de montaje del sensor, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones.

Disposición horizontal del tubo:

- No monte en la parte inferior del tubo cuando encuentre sedimentos ya que los mismos pueden causar pequeñas turbulencias.
- Monte a un máximo de 45° cuando haya burbujas de aire.
- Monte el sensor en posición derecha (0°), para lograr el mejor rendimiento el tubo debe estar lleno.

Figura 47. Posiciones de instalación del sensor de caudal.



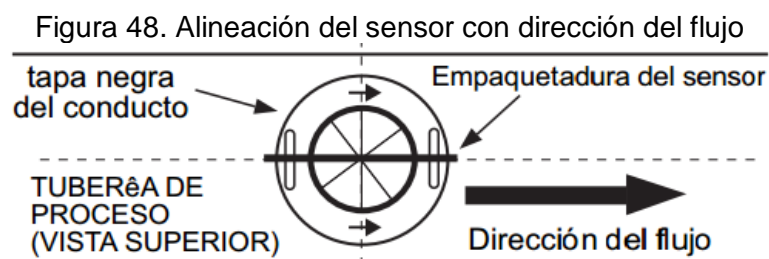
Fuente: <http://www.reskem.com/pdf/gfsignet-5152536spec.pdf>

Disposición vertical del tubo:

- El sensor puede montarse en cualquier orientación.
- Se prefiere un flujo ascendente para garantizar el llenado del tubo.

3.7.4 *Instalación del sensor de flujo.* Para el ajuste del sensor fue necesario la lubricación de las juntas tóricas (O-Ring) con lubricante viscoso no derivado del petróleo, mediante una torsión o traslado se baja el sensor a la pieza de anclaje, es importante tomar en cuenta que las flechas de instalación de la pata del sensor señalan la dirección de flujo.

Se debe acoplar la tapa del sensor y luego se gira el sensor hasta que la pestaña de lineación entre en la ranura de la pieza de anclaje. Todos los ajustes deben ser realizados de forma manual, no se debe utilizar ningún tipo de herramienta porque podría dañar el sensor.



Fuente: <http://www.reskem.com/pdf/gfsignet-5152536spec.pdf>.

Figura 49. Montaje de sensor de flujo



Fuente: Autores

3.7.5 *Montaje del servomotor.* Para el análisis de datos del chiller es necesario tener diferentes caudales, para lo cual se emplea un servomotor que se acopla a la llave de globo en la tubería principal. Para la sujeción del servomotor se emplea un bastidor que se sujeta al tanque reservorio mediante tornillos.

Este bastidor está construido mediante soldadura y se utilizó plancha de acero y pletina, el bastidor además de servir para la sujeción del servomotor sirve también para asegurar la llave de globo y para mantener estable la tubería.

Figura 50. Bastidor del servomotor



Fuente: Autores

El bastidor es sujetado a la parte superior del tanque reservorio por medio de pernos, estos ayudan a su sujeción, una vez sujetado el bastidor se procede al montaje y sujeción del servomotor como se muestra a continuación.

Figura 51. Montaje de servomotor



Fuente: Autores

3.7.6 *Montaje del hardware NI myDAQ.* El chiller cuenta con un tablero de control fabricado en acero, el cual tiene espacio suficiente para la ubicación de la tarjeta de adquisición de datos y los demás circuitos de adaptación de los sensores. Para el montaje de estos implementos que facilitaran la adquisición de datos, se debe fijar los circuitos y la tarjeta de adquisición atornillándolos al tablero para obtener una mayor sujeción. Además se usa la cinta doble faz como aislante.

Figura 52. Tablero de control



Fuente: Autores

Para poder realizar el encendido desde la computadora fue necesario la adaptación de un relé en estado sólido, este activa las bobinas del contactor y de esa manera se puede realizar el encendido del equipo a través del programa ejecutable que se lo carga en la computadora. A continuación se muestra el montaje del relé y la tarjeta de adquisición de datos en el tablero de control.

Figura 53. Montaje de NI myDAQ



Fuente: Autores

3.7.7 Programa LabView. El programa LabVIEW es un lenguaje de programación gráfica muy revolucionario el mismo que ayuda a los ingenieros en las diversas aplicaciones como adquisición de datos, diseño de entornos visuales, control automático, el análisis y el control de datos.

LabVIEW ofrece la integración del software con el hardware, además usa un lenguaje de programación muy amigable con el usuario denominado lenguaje G debido a que es un lenguaje gráfico, se basa en diagramas de bloques con iconos y símbolos gráficos en vez de la programación tradicional escrita.

LabVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LabVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos. Los programas que se desarrollan en este software se denominan VI (instrumentos virtuales), los mismos que están compuestos por un panel frontal y un diagrama de bloques; el panel frontal es la interfaz gráfica del VI con el usuario

En la interfaz gráfica se recogen las entradas proporcionadas por el usuario y las salidas que proceden del programa, contiene botones, pulsadores y demás controles que permiten al usuario el monitoreo y control de los parámetros.

El diagrama de bloques es en sí el que contiene el código fuente de la interfaz virtual VI, aquí se realiza la implementación del lenguaje de programación que permite el control automatizado de las entradas y salidas analógicas digitales que se crean en el panel frontal, incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora LabVIEW.

3.7.8 *Instrumentación virtual.* Es un concepto introducido por la compañía National Instruments (2001), este permite la utilización de una computadora personal como instrumento de medición por medio de transformación de señales de diferentes variables como caudal, temperatura, presión, etc. De esta manera surge el concepto de instrumento virtual (IV), definido como, un instrumento que no es real pero de gran ayuda para automatismos, se ejecuta en una computadora y tiene sus funciones definidas por el software, este sirve para el análisis, almacenamiento y procesamiento de datos.

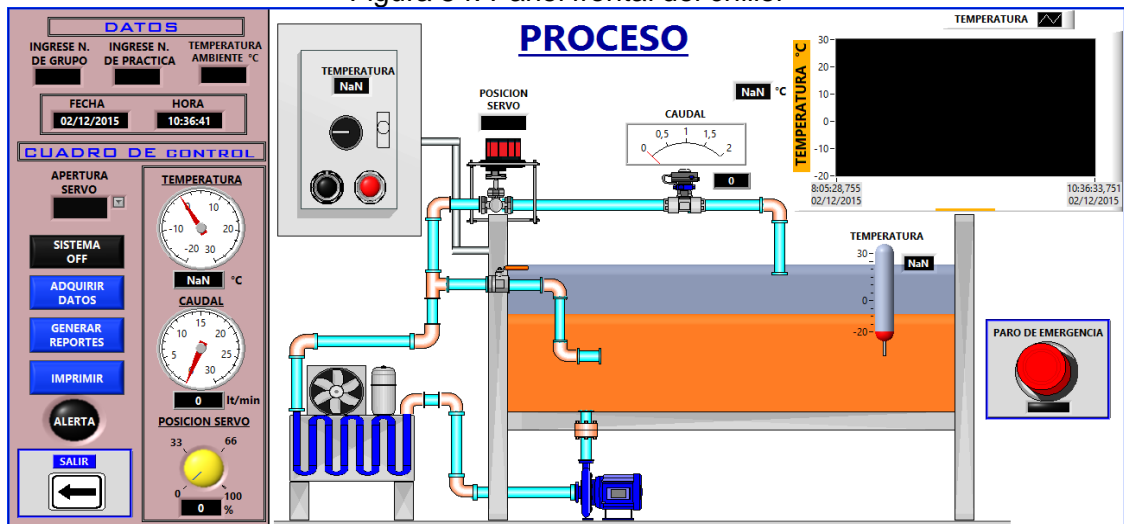
3.7.9 *Descripción del panel frontal.* Consta de todos los parámetros para el control y monitoreo en tiempo real de las variables de caudal y temperatura del chiller, además permite exportar los datos recopilados en un archivo plantilla de proceso en excel para la generación de reportes. A continuación se detalla las características del panel frontal:

- Diagrama del chiller.
- Número de grupo.
- Número de práctica.
- Temperatura ambiente.
- Fecha de la práctica.
- Hora de la práctica.
- Cuadro de controles.
- Indicador de la temperatura.
- Indicador del caudal.
- Control de posicionamiento del servo.
- Botón para adquirir datos.
- Botón para generar reportes.
- Botón para imprimir reporte.
- Botón salir.
- Gráfica en tiempo real de “temperatura vs tiempo”.

En las casillas establecidas en la interfaz gráfica como número de grupo, número de práctica y temperatura ambiente se debe ingresar el valor correspondiente a la práctica que se va a realizar e ingresar el valor de la temperatura a la cual se encuentra el laboratorio para el registro del ambiente convectivo en el instante de la prueba para un análisis de transferencia de calor.

Para la adquisición de los datos experimentales en cada prueba del equipo automatizado basta con presionar el botón adquirir datos, una vez que se haya determinado el tiempo necesario de la práctica se presiona el botón generar reportes para que el programa exporte automáticamente los datos a un archivo de excel donde se presenta de forma clara y ordenada los datos y las curvas obtenidas con los mismos.

Figura 54. Panel frontal del chiller



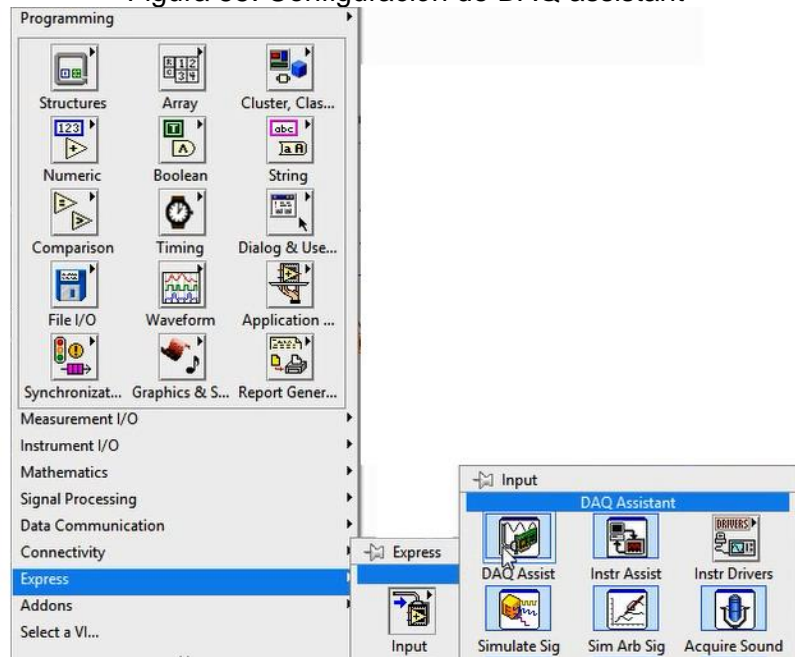
Fuente: Autores

3.7.10 Configuración del DAQ assistant para la adquisición de datos. Es necesario la configuración del DAQ assistant para que permita la comunicación de LabVIEW con la tarjeta de adquisición de datos para ello se ingresa a la librería express del programa en cualquiera de sus versiones, input y se da un click en icono DAQ Assist para su configuración.

Esto permite de una manera rápida y sencilla configurar el NI myDAQ para adquirir y generar señales tanto analógicas como digitales, para esto se debe seleccionar el tipo de señal a adquirir sea este para el sensor de temperatura NTC controlado por la ecuación exponencial de voltaje, el servomotor de alto torque y el sensor de caudal tipo paleta que entregada ondas de frecuencia senoidales.

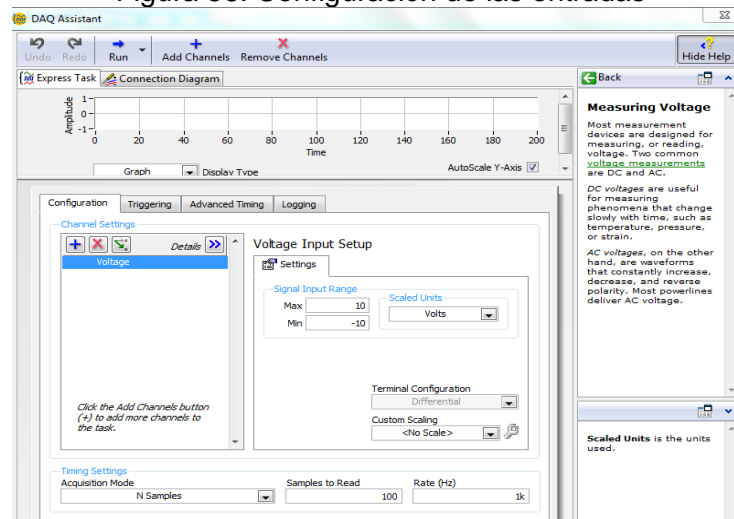
El programa muestra los canales físicos analógicos y digitales de la tarjeta de adquisición, se selecciona el canal que se va a utilizar dependiendo de en cuál de ellos se encuentra conectado el sensor a utilizar, además se configura el número de frecuencia del muestreo y voltajes de referencia.

Figura 55. Configuración de DAQ assistant



Fuente: Autores

Figura 56. Configuración de las entradas



Fuente: Autores

3.7.11 Generación de reportes. Una de las finalidades de la adquisición de datos es la generación de reportes, la misma que se logra incorporar mediante la programación de bloques en LabVIEW permitiendo de forma fácil y sencilla la creación de reportes personalizados.

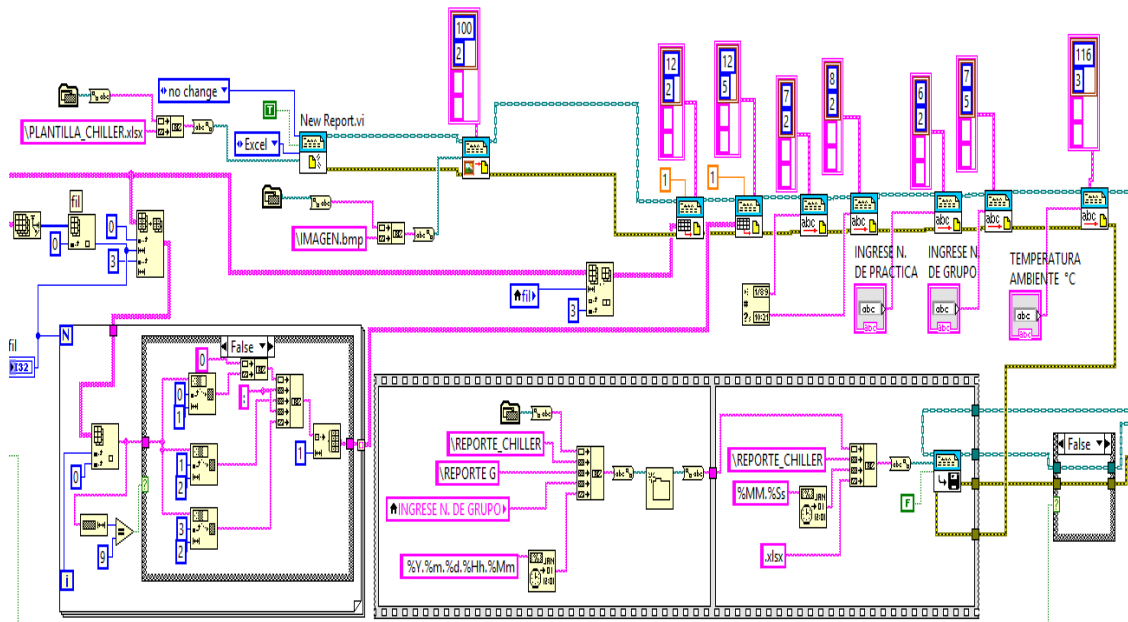
Estos reportes se los configura para que se exporten a una hoja de cálculo de Excel donde se los puede guardar e imprimir.

Para la exportación de los datos adquiridos se ha creado anteriormente una plantilla en una hoja de cálculo de microsoft excel. Para poder generar los reportes el panel frontal tiene tres botones denominados “Adquirir datos”, “Generar reporte” e “Imprimir”. El botón adquirir datos es el primero que se debe accionar para que el programa LabVIEW adquiera los datos en tiempo real al mismo instante que los almacena en el bloque de programación para exportar a la plantilla.

Posteriormente se presiona el boto “generar reporte” y los datos se trasladan a una hoja de cálculo de excel donde se almacenan, además se crean las curvas del sistema necesarias para el análisis de datos.

Finalmente el botón “imprimir” al ser presionado permite que se pueda imprimir los reportes que se almacenaron anteriormente. Para el correcto funcionamiento y ordenamiento de las jerarquías de los niveles de la programación se realizó un diagrama de flujo, aquí se detalla los pasos a seguir para la adquisición de datos como se muestra en la figura 58.

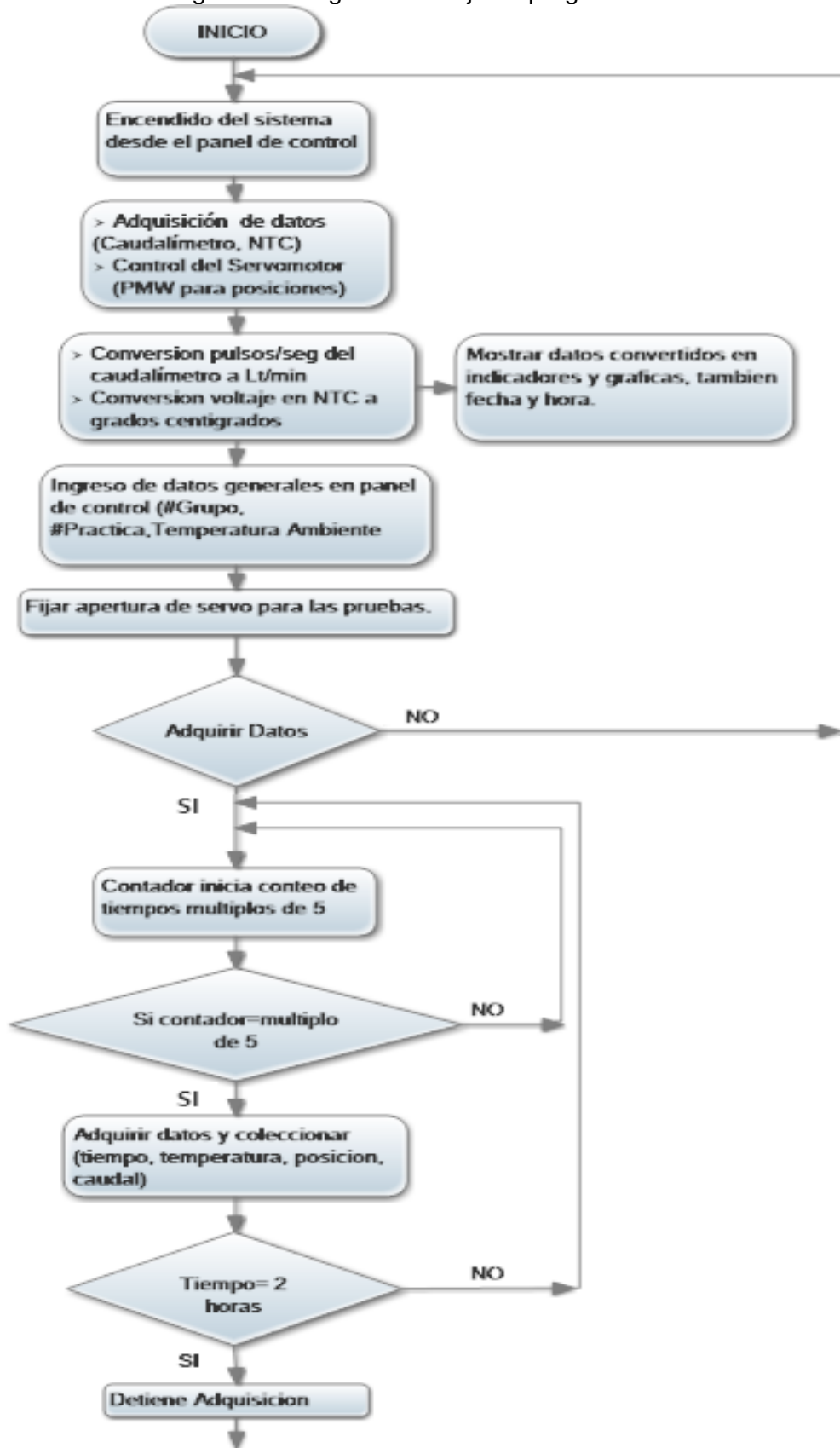
Figura 57. El bloque de programación de reportes



Fuente: Autores

El bloque de programación en lenguaje G del software LabVIEW se muestra en el anexo B: “Bloque de programación completo del sistema”

Figura 58. Diagrama de flujo de programación

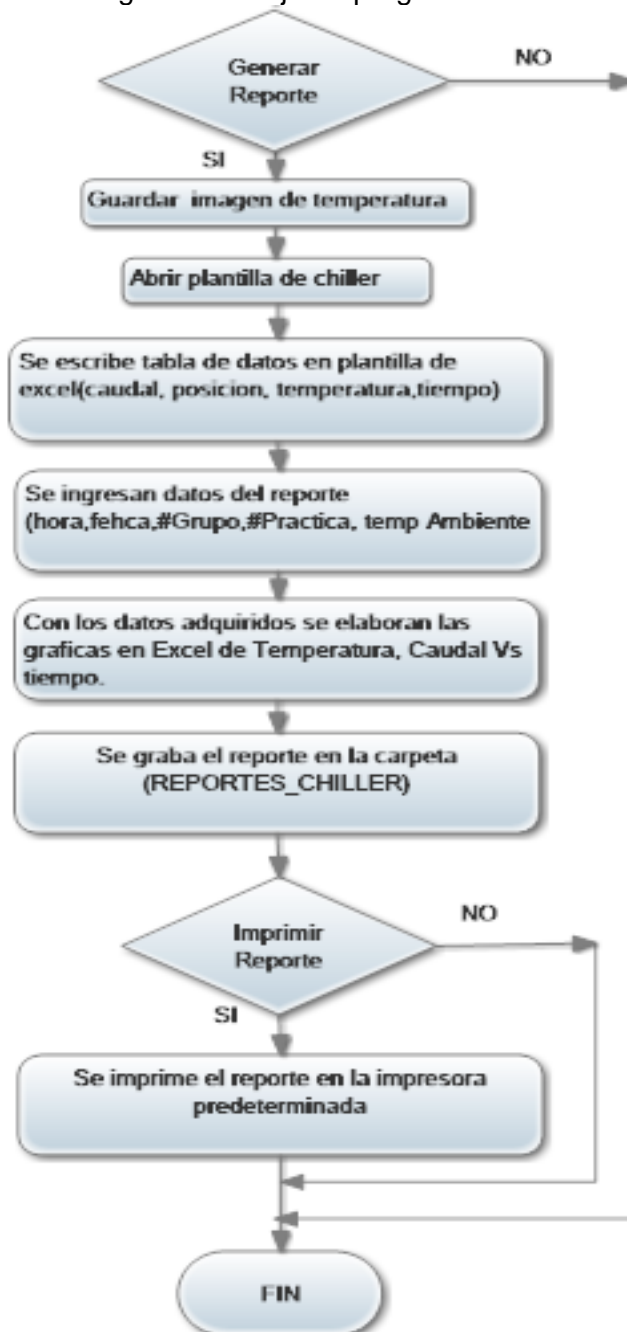


Fuente: Autores

El resto del diagrama de flujo del orden de programación sigue a continuación.

Para generar el reporte de datos experimentales en tiempo real hace falta la exportación de datos en una plantilla de excel como se dijo antes donde se orden variables tipo escritura.

Figura 59. Diagrama de flujo de programación continuación



Fuente: Autores

El programa se desarrolla con el fin de imprimir los resultados pero igual se exporta los datos a la plantilla aun así no haya la necesidad de imprimirlos en la práctica. La tabla de posibles fallas en la programación en lenguaje G se adjunta al final en el anexo N: "Tabla de posibles fallas o ajustes de la programación"

3.8 Manuales de mantenimiento y seguridad

3.8.1 *Finalidad de la normativa.* Para el correcto funcionamiento del equipo es necesario que se realice manuales de operación como de mantenimiento y de esta forma poder operar al equipo en óptimas condiciones evitando problemas de cualquier tipo.

Debido a los daños que se puedan dar con el tiempo en los diferentes componentes del chiller es necesaria la creación de un manual de operación y de mantenimiento, el mismo que simplifica las tareas de operación y el adecuado mantenimiento de los equipos.

El manual se basa básicamente en el mantenimiento preventivo y si es el caso la aplicación de un mantenimiento correctivo. Para la realización de las diferentes prácticas en el laboratorio es necesario el conocimiento de los datos técnicos del equipo y de todos los instrumentos, elementos y demás implementos.

El conocimiento de la manipulación de estos equipos es necesario para evitar cualquier tipo de falla en el equipo, por lo cual es indispensable que se analice cada uno de los elementos que conforma el equipo. Con dicho conocimiento del manejo y mantenimiento de estos elementos se logrará aprovechar al máximo el equipo.

3.8.2 *Objetivos del mantenimiento.*

- Mantener los diferentes elementos y equipos del chiller en sus mejores condiciones para un correcto funcionamiento del mismo.
- Mantener un registro estadístico con su respectivo historial de fallas y averías con la finalidad de realizar un adecuado procedimiento de corrección y mejora continua en los laboratorios
- Tener un mayor conocimiento de las partes principales del equipo además de su operación y mantenimiento para alargar la vida útil del mismo.

3.8.3 *Nomenclatura.* Es necesaria para poder identificar de una manera más rápida a los equipos de la facultad de mecánica y con ello poder elaborar de una mejor manera las tablas, fichas y registros de mantenimiento.

Facultad	
FAME – Facultad de Mecánica	
Área	
LE – Laboratorio de Electrotecnia	
EB – Laboratorio de Electrónica Básica ME	
– Laboratorio de Máquinas Eléctricas LV	
– Laboratorio de Vibraciones	
LT – Laboratorio Turbo maquinaria	
MF – Laboratorio de Mecánica de Fluidos	
IC – Laboratorio de Instrumentación y Control Automático	
LM – Laboratorio de Materiales	
RM – Laboratorio de Resistencia de Materiales NA	
– Laboratorio de Neumática y Automatización	
HN – Laboratorio de Sistemas Hidráulicos y Neumáticos	
TC – Laboratorio de Transferencia de Calor LF	
– Laboratorio de Física I, II, III	
MH – Taller de Máquinas Herramientas TS	
– Taller de Soldadura	
TF – Taller de Fundición	
Sistema	
CA – Caldera	
IC – Intercambiador de calor BR	
– Banco de refrigeración IN	
– Instrumento	
EC – Equipo complementario	
Número del equipo	

3.8.4 *Generalidades.* Para poder manipular y poner en marcha cualquier equipo del laboratorio es necesario que se revise el manual de operación de la máquina, ya que en él se detallan los pasos a seguir para la puesta en marcha. Se elabora una ficha técnica del equipo en el cual se detallan todas sus partes y demás información necesaria para la puesta en marcha del chiller. Las tablas de las fichas técnicas se encuentran en el anexo K: “Fichas técnicas del manual de mantenimiento”

3.9 Manual de mantenimiento

Para el correcto funcionamiento y conservación de los equipos e instrumentos, se debe realizar tareas de mantenimiento preventivo debido a la manipulación y desgaste.

3.9.1 *Previsiones para tareas de mantenimiento.* Mediante las tareas de mantenimiento se logra disminuir las fallas en los equipos logrando tenerlos listos para la operación a su máximo nivel. A continuación se detalla los parámetros necesarios para el mantenimiento.

- Condiciones ambientales, analizar el ambiente en el que se encuentra el equipo, ya sea en funcionamiento o en almacenamiento. Se recomienda evaluar temperatura, humedad, presencia de polvo, exposición a vibraciones mecánicas y seguridad de la instalación.
- Limpieza integral externa, eliminar los excesos de sedimentos y polvos que se encuentren sobre el equipo, mediante la utilización del equipo e implementos adecuados.
- Inspección externa del equipo, examinar y revisar la parte exterior del equipo en busca de fallas o daños que pudieran estar afectando al mismo. Se revisa las conexiones eléctricas, las instalaciones hidráulicas y demás componentes externos.
- Limpieza integral interna, se elimina al máximo posible el polvo que pueda estar dentro de equipo como el panel de control, tarjeta de adquisición de datos, cables, conexiones de sensores y demás implementos.
- Inspección interna, examinar o reconocer atentamente las partes internas del equipo y sus componentes, para detectar posibles daños como cables sueltos, signos de corrosión, golpes y desgaste de elementos.
- Reemplazo de partes defectuosas, en el caso de existir un daño se debe realizar el remplazo del elemento defectuoso por uno nuevo de acuerdo a los datos del fabricante.
- Revisión de seguridad eléctrica, la realización de esta prueba, dependerá del grado de protección que se espera del equipo en cuestión. Ajuste y calibración: se debe revisar los sensores en busca de daños y en el caso de existir lecturas erróneas se deberá realizar la respectiva calibración. Para llevar a cabo estas tareas de mantenimiento se cuenta con herramientas y equipos necesarios como se detalla a continuación una a una.

- Detergente, se lo utiliza para limpiar superficies externas del equipo.
- Brocha, es una escobilla que se la usa para desplazar el polvo y suciedad de los equipos y para aplicar capas de pintura.
- Franela, es un tejido suave que puede ser de algodón o fibras sintéticas y se utiliza en la limpieza de superficies.
- Limpiador de contactos, se los utiliza para la limpieza de equipos eléctricos y electrónicos como la tarjeta de adquisición de datos, contactor, relé en estado, relé térmico, etc. Este es muy utilizado porque no es corrosivo.
- WD40, se lo utiliza para limpieza, para desplazar la humedad, para desprender elementos oxidados, como lubricante y como protección exterior de equipos.
- Guantes, están fabricados de diferentes materiales y sirven de protección para las mano cuando se va a manipulas equipos y herramientas.
- Multímetro, es un instrumento eléctrico portátil para medir directamente corriente, voltaje y resistencia. Destornilladores, los hay en varios tamaños, generalmente sus puntas son planas o estrelladas y sirven para aflojar o sujetar, tornillos.
- Caja de herramientas, se entiende por todos las herramientas básicas para desarmar una máquina, como por ejemplo, desarmadores tipo estrella y plano, juego de llaves hexagonales, dados mecánicos, alicates, metro, calibrador pie de rey, llaves inglesas, etc.

Dentro de los elementos sujetos a mantenimiento preventivo o correctivo si es el caso podemos mencionar los siguientes:

- Visor líquido de Refrigerante: El ojo visor se debe verificar cada vez que se va a poner en marcha el equipo, el mismo que indica el nivel de refrigerante y que no exista burbujeo.
- Conexiones eléctricas: Se debe utilizar la protección adecuada como guantes para la verificación del estado de estas conexiones, ya que una falla provocaría que el equipo no arranque.

- Válvulas de paso: Se debe verificar un buen estado de apertura y cierre de las mismas debido a los agentes corrosivos de la salmuera en circulación que tienden a endurecerlas para lo cual deben ser desmontadas y realizar la respectiva limpieza, utilizar para esto WD-40 que remueve la corrosión y sirve de agente lubricante.
- Sensor de flujo: Debido a que este sensor está en contacto directo con el fluido siendo el mismo una solución salina muy corrosiva se debe revisar el rotor de las paletas del sensor el mismo que si se encuentra para verificar su estado óptimo en caso de deterioro se procede al cambio del rotor para lo cual se utiliza un destornillador para separar el rotor de la base y proceder a su cambio, hay que tener en cuenta que se realice con extremo cuidado porque se pueden romper los soportes del rotor.
- Sensor de temperatura: Se comienza con la revisión de los cables conductores ya que se encuentran parcialmente sumergidos al igual que el sensor, si durante la adquisición se muestran datos incoherentes se procede a la calibración o cambio del mismo
- Tablero de control: Es aquí donde se encuentran todas las instalaciones eléctricas de todo el equipo es por eso que se debe verificar que todas las conexiones no estén flojas y que sean correctas, tanto las terminales del contactor para control de la unidad condensadora y la bomba, como el controlador de temperatura y el relé de estado sólido que sirve para el control en paralelo del sistema manual y el control automatizado.
- Servo motor: Siendo el encargado del proceso de apertura de la válvula de paso se debe verificar el correcto acoplamiento a la base de sujeción y al acople de la brida con la válvula para ello se revisa que los pernos de sujeción no estén flojos y que los cables de alimentación no estén deteriorados.
- Tarjeta de adquisición NI-myDAQ: A este instrumento se conectan todos los sensores de las variables de control del sistema por lo cual hay que verificar que se encuentre correctamente sujetos sobre todo el cable de la fuente de alimentación. A demás se tiene que tener extremo cuidado al momento de manipular el dispositivo cuando se tenga que desmontar y realizar el mantenimiento respectivo.

- Instalaciones Hidráulicas: Se debe realizar una inspección visual de las mismas en busca de posibles fugas del líquido refrigerado sobre todo en los elementos de unión como codos, tees, uniones, etc. Si fuese el caso puede dañar el recubrimiento aislante teniendo que reemplazarlo y ajustar las partes que estén flojas.
- Tanque reservorio: Para garantizar el permanente nivel de líquido dentro del tanque abierto se realiza una inspección visual verificando posibles fugas sobre todo en los acoples de la bomba centrífuga y el orificio de descarga del líquido del tanque, en caso de existir fugas se ajusta los acoples y se sella con silicona negra.
- Bomba centrífuga: Para un correcto funcionamiento de la bomba se debe trabajar en las condiciones de diseño iniciales, que involucran una composición de no más del 20% de concentración de salmuera, en pruebas mayores a esta concentración la bomba sufre de sobrecalentamiento después de una hora de trabajo debido al cambio brusco en la densidad de la salmuera, verificar además que la eficiencia de la misma sobre todo las caídas de presión, si es el caso se procede al mantenimiento de incrustaciones dentro del tanque de la bomba. Además verificar los sellos mecánicos.
- Compresor hermético: Debido a su constitución no requiere de un mantenimiento frecuente, mediante revisión visual se pueden determinar un síntoma de falla por la vibración o excesivo aumento de temperatura de la superficie exterior del mismo, lo que indica una sobre presión dentro del compresor.

Si es el caso debe revisarse el estado de carga y las presiones de funcionamiento tanto de la zona de baja presión como la de alta presión, para esto se pueden medir la corriente de trabajo mediante la utilización de un multímetro de pinza revisando que la intensidad de corriente este en el rango de 13,2 A tal como indica la placa de diseño de la unidad condensadora

3.9.2 *Tareas de mantenimiento.* En la siguiente tabla guía se detallan las tareas de mantenimiento preventivo a las que está sujeto el equipo para procesos de refrigeración industrial “chiller”. Se tiene en cuenta todo el conjunto del sistema tanto la unidad condensadora, el intercambiador de calor, el sistema de bombeo hidráulico y el tanque reservorio de la salmuera de calcio.

Tabla 13. Tareas de mantenimiento para el Chiller

N°	Tarea	Ide.	Superficie
01	Limpieza externa	A	Unidad condensadora
		B	Tanque reservorio
02	Limpieza interna	A	Tanque reservorio
		B	Circuitos
03	Cambio de refrigerante	A	R404A
04	Ajustes de conexiones eléctricas	A	General

Fuente: Autores

Las tareas específicas de la organización de mantenimiento se han establecido y desarrollado en función de un mantenimiento preventivo y correctivo, la planificación que se debe llevar a cabo en el equipo de refrigeración, unidad de bombeo y unidad condensadora chiller están detalladas en el anexo K: “Fichas técnicas de manual de mantenimiento”.

Además las tablas de registro donde se especifica las anomalías, sus posibles causas y la corrección necesaria se encuentran dentro del anexo de las fichas técnicas de manual de mantenimiento.

Una vez realizado las tareas anteriormente mencionadas es necesario la implementación de un plan anual de mantenimiento el mismo que se describe en el anexo anteriormente mencionado, además se debe llevar un registro de las averías encontradas en el equipo y una tabla donde se anoten los repuestos utilizados para el mantenimiento, estos se detallan en los anexos L: “Tabla de historial de averías” y M: “Repuestos utilizados en reparaciones”.

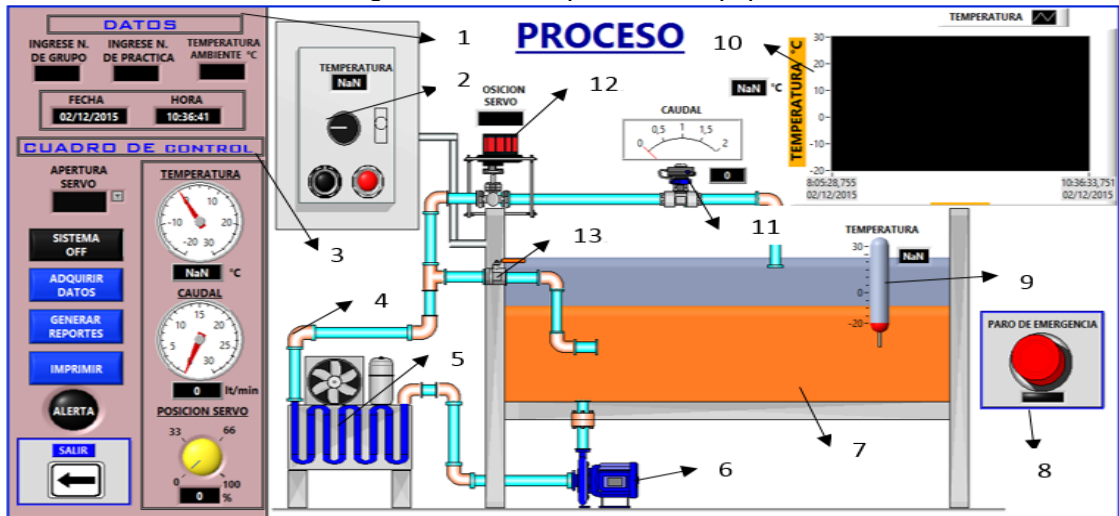
3.9.3 *Manual de operaciones.* El manual de operación se debe revisar cada vez que se desea poner en marcha el equipo. Para este motivo se elaboró el manual de usuario que se describe a continuación.

Los elementos que conforman el equipo se los representa en el programa para la adquisición de datos, en él se detalla cada uno de los elementos necesarios para la puesta en marcha del equipo como también para la adquisición de datos, como se los muestra a continuación.

Antes de poner en marcha el equipo es necesario que se revise las conexiones eléctricas, teniendo en cuenta que el chiller funciona con dos alimentaciones de

corriente una de 220 V y una de 110 V las cuales deben estar correctamente conectadas a su respectiva toma.

Figura 60. Descripción del equipo



Fuente: Autores

Tabla 14. Descripción de elementos del equipo

Referencia	Descripción
1	Cuadro de datos, aquí se ingresa datos de, N° de grupo, N° de práctica, temperatura ambiente.
2	Tablero de control, consta de luces de alarma, selector para encendido, y controlador de temperatura.
3	Cuadro de controles, consta de los indicadores de temperatura, posición del servo, caudal. Además de los botones de adquirir datos, generar reportes, Imprimir, luz de alerta y salir.
4	Tuberías hidráulicas
5	Unidad condensadora
6	Bomba de recirculación
7	Tanque de almacenamiento de la salmuera
8	Botón para paro de emergencia
9	Sensor de temperatura
10	Gráfica en tiempo real del sensor de temperatura
11	Sensor de caudal
12	Servomotor
13	Llave de globo para paso de fluido.

Fuente: Autores

En el equipo existe una tubería en bypass que sirve para la utilización del chiller sin la necesidad del encendido de la adquisición de datos, debe asegurarse que la llave de paso en esta tubería se encuentre totalmente cerrada. Asegurarse que exista un nivel

óptimo de salmuera en el tanque, este mismo debe ser agitado para que se realice una mezcla homogénea del mismo.

Para encender el equipo se debe ejecutar el programa para la adquisición de datos desde el escritorio de la computadora, el mismo que muestra el panel de control desde donde se puede encender el equipo al dar un clic en el botón "SISTEMA ON". Debemos asegurarnos que no exista ninguna alarma del equipo, para lo cual se debe observar que la luz de alarma verde se encuentre encendida, caso contrario revisar el equipo.

Para comenzar la adquisición de datos se debe dar una apertura necesaria al servo de acuerdo al caudal que se vaya a realizar la práctica, para lo cual debe seleccionar la apertura de 33%, 66% y 100 % en la pestaña "APERTURA DE SERVO", a continuación se pulsa el botón adquirir datos. Una vez realizada la toma de datos durante el tiempo que sea necesario para lograr la temperatura requerida para la práctica, se pulsa el botón "GENERAR REPORTE" el mismo que registra los datos recopilados en una hoja de cálculo de Microsoft Excel para elaborar las curvas de enfriamiento.

Para imprimir este reporte basta pulsar el botón imprimir y se imprimen los informes que se generaron anteriormente. Por ningún motivo se debe apagar el equipo mientras se está realizando la toma de datos hasta que haya terminado el tiempo estimado para la práctica. Para terminar se debe pulsar el interruptor selector para apagar el equipo y a luego se pulsa el botón de salir terminando el proceso.

3.10 Manual de seguridad

Dentro de las recomendaciones generales de seguridad tenemos:

- Es necesario asegurarse que los dispositivos de enclavamiento, seguridad y emergencia del equipo se encuentren en su lugar y correctamente instalados, estos dispositivos no deben ser removidos salvo el caso de mantenimiento.
- Respetar todas las normas de seguridad que se deben tener en cuenta al momento de realizar pruebas en cualquier equipo del laboratorio.
- Observar la señalización de seguridad que consta en el equipo para evitar daños a la seguridad personal y a los equipos.

- Por ningún motivo se debe manipular la maquina mientras esta se encuentra en funcionamiento, si es necesario alguna reparación hacerla con el equipo apagado.
- Utilizar los equipos de protección personal adecuados como guantes, gafas, entre otros para realizar trabajos de reparación y mantenimiento de los equipos.
- No ingerir alcohol ni fumar cuando se va a realizar pruebas en los equipos.
- Revisar el manual de operación antes de realizar cualquier prueba, esto evitara que se cause algún daño en el equipo.
- Se aconseja que cuando trabaje con equipos que tenga partes móviles a plena vista evite llevar prendas sueltas, joyas y si es posible el cabello corto o recogido.
- Verificar que exista una buena iluminación y que permita el reconocimiento de todas las partes del equipo.
- Luego de realizadas las practicas colocar los materiales ocupados en su lugar y limpiar el laboratorio.
- Realizar cualquier trabajo en los equipos con extremo cuidado sin poner en riesgo su propia integridad.
- Utilizar las guías de laboratorio donde se detallan los pasos a seguir en las practicas.
- En caso de algún daño o avería acudir al personal técnico especializado que se encuentre a cargo del laboratorio.

3.10.1 *Seguridad al momento de adquirir datos en en chiller.* Cada vez que se desea realizar una práctica en el chiller es necesario que se tomen en cuenta las siguientes recomendaciones de seguridad.

3.10.1.1 *Advertencias sobre la instalación.* El sistema automatizado funciona en paralelo con el mando manual, por seguridad la alimentación de la placa electrónica

siempre es desconectada después de cada práctica. Entonces, lo primero es conectar el cable de alimentación de la placa de alimentación electrónica.

- Asegurarse que las conexiones de corriente trifásica para la unidad condensadora y monofásica para la motobomba JET estén bien conectadas.
- Conectar el cable de conexión de datos USB para el controlador de la plataforma virtual del equipo de refrigeración.
- Por lo general el servo motor siempre queda en alguna apertura de la válvula de compuerta, sin embargo por seguridad antes de encender el sistema desde la plataforma virtual abrir la válvula del by-pass del arreglo hidráulico para evitar inconvenientes con la bomba.

3.10.1.2 *Advertencias sobre la operación.* Recordando que la unidad condensadora mantiene al refrigerante R404 A separada en las zonas de alta presión y la de baja presión es importante que durante la operación normal del sistema que si se apaga antes de volver a encender se debe esperar al menos cinco minutos por la variación de presiones en el compresor, caso contrario se corre el riesgo de quemar el compresor hermético.

- Asegurarse que no haya objetos que puedan enredarse en el ventilador de la unidad condensadora ni elementos extraños.
- En operación durante el enfriamiento no se puede tener contacto con la solución salmuera en base cloruro de calcio ya que la misma desciende hasta temperaturas inferiores a los 0°C centígrados.

CAPÍTULO IV

4. FASE EXPERIMENTAL DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Una vez repotenciado el equipo con una eficiencia del 72% determinada en capítulo anterior se comienza el análisis para la construcción de las familias de curvas de enfriamiento. En primera instancia se procede a realizar un análisis de composición de la salmuera con el fin de determinar el porcentaje de composición del cloruro de calcio disuelto en agua.

4.1 Cálculo para determinar la densidad de cloruro de calcio por el método del picnómetro.

Para el análisis de la concentración del cloruro de calcio se ocupó una balanza de densidades, la misma que proporciona el resultado de la densidad de la muestra en g/cm^3 como se indica en la figura 61. Sin embargo para comparación de resultados se realizó el cálculo de la densidad por medio del uso del picnómetro que es un recipiente de vidrio con tapa.

Primero se pesa el picnómetro vacío y se anota su masa, luego se pesa el picnómetro más la muestra y se anota su masa, la diferencia entre las masa es el peso real de muestra, como el volumen es conocido se puede determinar la densidad de la muestra como se indica a continuación.

Tabla 15. Resumen de datos para el cálculo de densidad

Detalle	Datos obtenidos
Peso del picnómetro seco	30,0558 g
Peso de picnómetro + la muestra	89,9785 g
Peso de la muestra real	$30,0558 - 89,9785 = 59,9227$ g
Volumen real del picnómetro	50 cm^3
Temperatura de la muestra de CaCl_2	19,9 $^\circ\text{C}$

Fuente: Autores

Se debe calcular la densidad de la muestra la cual está definida en función de la masa de la solución y el volumen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (23)$$

Dónde:

ρ = Densidad de la solución [g/cm^3]

m = Masa de la solución [g]

v = Volumen de la solución [m^3]

Figura 61. Descripción del equipo



Fuente: Autores

Remplazando se obtiene:

$$\rho = \frac{59,9227 \text{ g}}{50 \text{ cm}^3}$$

$$\rho = 1,198 \text{ g}/\text{cm}^3$$

Según el anexo C: “Corrección de densidad por temperatura” del manual de cloruro de calcio, especifica que para encontrar la densidad corregida de la muestra se debe restar un factor de 0,002 al valor de densidad encontrado anteriormente obteniendo el siguiente resultado.

$$\rho = 1,198 \text{ g}/\text{cm}^3 - 0,002 = 1,196 \text{ g}/\text{cm}^3$$

Se considera esta densidad corregida para saber la concentración real de la solución de CaCl_2 , el valor de la concentración se la obtiene del anexo D: “Equivalencia para la determinación de la concentración de CaCl_2 ” tomando como referencia la densidad de $1,195 \text{ g}/\text{cm}^3$ se obtiene una concentración de cloruro de calcio CaCl_2 de aproximadamente 21,0% a partir de la cual se comienza a realizar las pruebas para determinar las curvas de enfriamiento de dicha concentración.

4.2 Cambio de la concentración de cloruro de calcio

Para analizar el comportamiento de las curvas de enfriamiento cambiando la concentración en peso de la salmuera se preparan tres diferentes concentraciones para el 15%, 21% y 30% de concentración.

Partiendo de una concentración del 21% se realiza el siguiente cálculo de balance en peso para llegar al 30% de concentración de cloruro de calcio destinado para el segundo análisis, tomando en cuenta que se tiene un volumen de 218 l de solución. Se necesita una concentración del 30%.

$$\begin{aligned} 30 \text{ kg} &\rightarrow 0,10 \text{ l} \\ X \text{ kg} &\rightarrow 218 \text{ l} \\ X_{\text{kg}} &= \frac{218 \text{ l} * 30 \text{ kg}}{0,1 \text{ l}} = 65,4 \text{ kg} \end{aligned}$$

Del cálculo anterior se deduce que se deben agregar 65,4 kg de cloruro de calcio en escamas a la disolución de salmuera en agua que tiene 21% de concentración para elevar su concentración a una mayor obteniendo al final una concentración del 30% que para fines experimentales es el punto eutéctico en el cual el cloruro de calcio alcanza su temperatura más baja que es de -50 °C motivo por el cual se analizó dicha concentración.

Para obtener una composición del 15% de concentración se utiliza la fórmula 1 del manual del cloruro de calcio, la cual sirve para determinar los litros de agua que se debe agregar a una solución de cloruro de calcio de volumen conocido para diluirla a una solución menos concentrada, partiendo de la concentración que se obtuvo anteriormente del 30%. (OCCIDENTAL, 2006)

$$\text{Vol. Sol} = \left[\frac{\% \text{Sol. conc.} - \% \text{Sol. dil.}}{\% \text{Sol. dil.}} \right] \times \text{g. espSol. conc.} \quad (24)$$

Dónde:

Sol.con = Solución concentrada

Sol.dil = Solución diluida

g.espSol = Gravedad específica de la solución (anexo E)

Vol.Sol = Volumen de la solución [l]

$$\text{Vol. Sol} = \left[\frac{30\% - 15\%}{15\%} \right] \times 1,299$$

$$\text{Vol. Sol} = 1,299 \text{ l}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, se deben agregar 1,299 l de agua por cada litro de solución concentrada para rebajar la concentración del 30% a 15% se usa esta secuencia en vista de que no se cuenta con más salmuera en escamas.

Una vez determinadas las concentraciones del 15%, 21% y 30% se procede al análisis de comportamiento del cloruro de calcio y a determinar sus respectivas curvas de enfriamiento. Además es necesario el análisis del punto de operación del equipo principalmente de la bomba de recirculación debido a las estrangulaciones que se hace en la tubería para la variación de caudal.

4.3 Análisis del cambio funcional del equipo

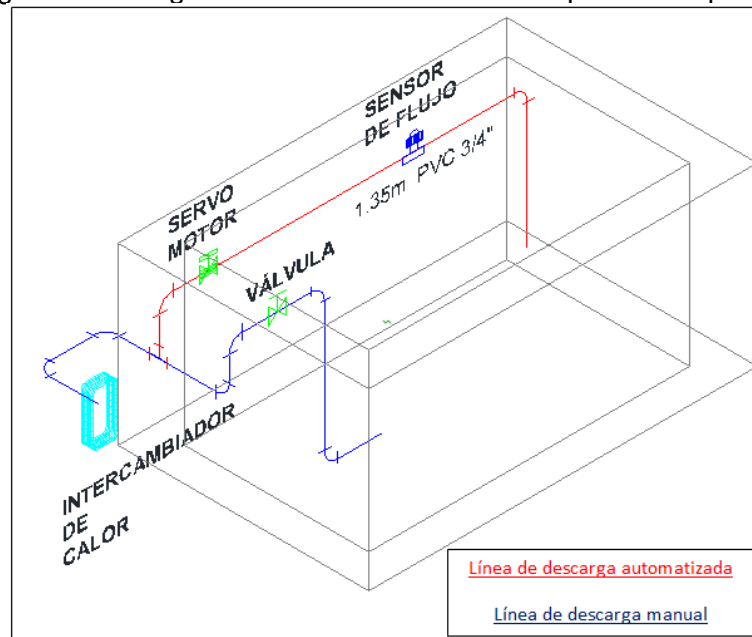
El punto de operación de la bomba centrífuga mediante la estrangulación de la válvula de paso controlada por el servo motor conlleva a la variación del caudal y con ello a la variación de la velocidad de enfriamiento, además provoca que el punto de operación de la motobomba de recirculación varíe en función de la estrangulación resultando así un aumento o disminución de la eficiencia principalmente por la variación de la resistencia al flujo másico del equipo motivo por el cual se procede a realizar el análisis del mismo.

4.3.1 *Cambio del punto de operación del equipo por estrangulación.* Al cambiar el caudal para el análisis del comportamiento de la velocidad de enfriamiento de la salmuera provoca un cambio del punto de operación en la bomba centrífuga, el mismo que determina un rendimiento distinto por cada estrangulación por el cambio de la resistencia al flujo.

Después de realizar los arreglos para implementar los sensores y actuadores necesarios para la adquisición de datos es necesario realizar el cálculo de pérdidas de carga para la construcción de las curvas de sistema de cada estrangulación. De la nueva instalación hidráulica para la circulación del cloruro de calcio se tiene accesorios detallados en la tabla siguiente al igual que el factor K de pérdidas de cargas, factores que se pueden encontrar en el anexo F: "Factor K de pérdidas de carga".

El cálculo de energía de presión estima los puntos de operación del equipo, para lo cual se calcula las pérdidas de carga por longitud de tubería y por accesorios, cálculos que se resumen en las siguientes tablas para las estrangulaciones de 25%, 50%, 75% y 100% de apertura según corresponda, la siguiente figura muestra el nuevo arreglo hidráulico que se realizó.

Figura 62. Arreglo de la instalación hidráulica para la adquisición



Fuente: Autores.

Tabla 16. Pérdidas de carga por fricción en accesorios para la adquisición.

Cloruro de calcio al 30% a temperatura de 20 °C			
Viscosidad dinámica (anexo G)		0,0034	kg/(m·s)
Densidad (anexo E)		1290,00	Kg/m ³
Longitud de tubería		2,86	m
Accesorios	Cantidad	Factor unitario (K)	Factor total (K)
Válvula 0% de apertura	1	0,00	0,00
Válvula 25% de apertura	1	150,00	150,00
Válvula 50% de apertura	1	33,30	33,30
Válvula 75% de apertura	1	4,40	4,40
Válvula 100% de apertura	1	1,30	1,30
Tee	1	3,00	3,00
Codo 90	9	0,70	6,30
Intercambiador	1	20,00	20,00
Universal	1	0,24	0,24
Sensor de flujo	1	0,25	0,25

Fuente: Autores

Los datos de pérdidas de carga para la construcción de las diferentes curvas del sistema por cada estrangulación están graficados en el anexo H: "Puntos de operación de la bomba a diferente caudal". Donde se establece la eficiencia del sistema de bombeo a cada estrangulación.

Tabla 17. Resumen de cálculo de pérdidas para 25% de estrangulación.

Q[l/min]	Q[m ³ /s]	V[m/s]	Re	λ	Hr [m]	Hra [m]	Hs[m]	H _T [m]
0	0	0	0	0	0	0	0	1,07
10	1,67E-04	0,655	4472,972	0,014	0,050	3,931	3,981	4,26
20	3,33E-04	1,310	8945,943	0,007	0,099	15,724	15,823	16,93
25	4,17E-04	1,637	11182,429	0,006	0,124	24,568	24,692	26,42
28	4,67E-04	1,834	12524,320	0,005	0,139	30,818	30,957	33,12

Fuente: Autores.

Tabla 18. Resumen de cálculo de pérdidas para 50% de estrangulación.

Q[l/min]	Q[m ³ /s]	V[m/s]	Re	λ	Hr [m]	Hra [m]	Hs[m]	H _T [m]
0	0	0	0	0	0	0	0	1,07
10	1,67E-04	0,655	4472,972	0,014	0,050	1,379	1,429	2,50
20	3,33E-04	1,310	8945,943	0,007	0,099	5,518	5,617	6,69
30	5,00E-04	1,965	13418,915	0,005	0,149	12,415	12,564	13,63
43	7,17E-04	2,816	19233,778	0,003	0,214	25,505	25,719	26,79

Fuente: Autores.

Tabla 19. Resumen de cálculo de pérdidas para 75% de estrangulación.

Q[l/min]	Q[m ³ /s]	V[m/s]	Re	λ	Hr [m]	Hra [m]	Hs[m]	H _T [m]
0	0	0	0	0	0	0	0	1,07
10	1,67E-04	0,655	4472,972	0,014	0,050	0,748	0,797	1,87
20	3,33E-04	1,310	8945,943	0,007	0,099	2,990	3,090	4,16
40	6,67E-04	2,620	17891,886	0,004	0,199	11,960	12,159	13,23
53	8,83E-04	3,471	23706,749	0,003	0,263	20,998	21,261	22,33

Fuente: Autores.

Tabla 20. Resumen de cálculo de pérdidas para 100% de estrangulación.

Q[l/min]	Q[m ³ /s]	V[m/s]	Re	λ	Hr [m]	Hra [m]	Hs[m]	H _T [m]
0	0	0	0	0	0	0	0	1,07
10	1,67E-04	0,655	4472,97	0,014	0,050	0,680	0,729	1,80
20	3,33E-04	1,310	8945,94	0,007	0,099	2,719	2,818	3,89
40	6,67E-04	2,620	17891,89	0,004	0,199	10,876	11,075	12,14
54	9,00E-04	3,537	24154,05	0,003	0,268	19,821	20,090	21,16

Fuente: Autores.

A partir de la curva de rendimiento de la bomba centrífuga jet proporcionada por el fabricante se estima la eficiencia de la bomba de acuerdo al rango de operación, para las diferentes estrangulaciones las cuales se resumen en la siguiente tabla donde claramente se nota la variación de la eficiencia de bombeo por el aumento de resistencia al flujo.

Tabla 21. Eficiencia de la bomba a diferentes aperturas

Apertura de la válvula[%]	Eficiencia de la bomba [%]
25	49
50	60
75	56
100	55

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos se corrobora la intuición de un sobre esfuerzo de la bomba centrífuga para un 25% de apertura de la válvula de globo, rendimiento que es del 49% de eficiencia, provocando que exista un recalentamiento de la bomba en periodos a partir de una hora de funcionamiento para una concentración de 30% del cloruro de calcio.

En la experimentación se observa que partiendo del diseño original del equipo de refrigeración chiller una concentración del 30% de solución es muy pesada para el equipo por lo que después de aproximadamente una hora de funcionamiento la adquisición de datos de temperatura necesita breves descansos de funcionamiento por sobrecalentamiento.

4.4 Realización de pruebas

4.4.1 *Análisis de la sensibilidad en la toma de datos experimentales.* Una vez calibrados los instrumentos y automatizada la adquisición de datos es importante realizar pruebas de sensibilidad para asegurar que la toma de datos es fiable dentro de márgenes de errores experimentales, por lo cual se realiza dos pruebas en similares condiciones ambientales convectivas los días viernes 26 y sábado 27 de junio del 2015.

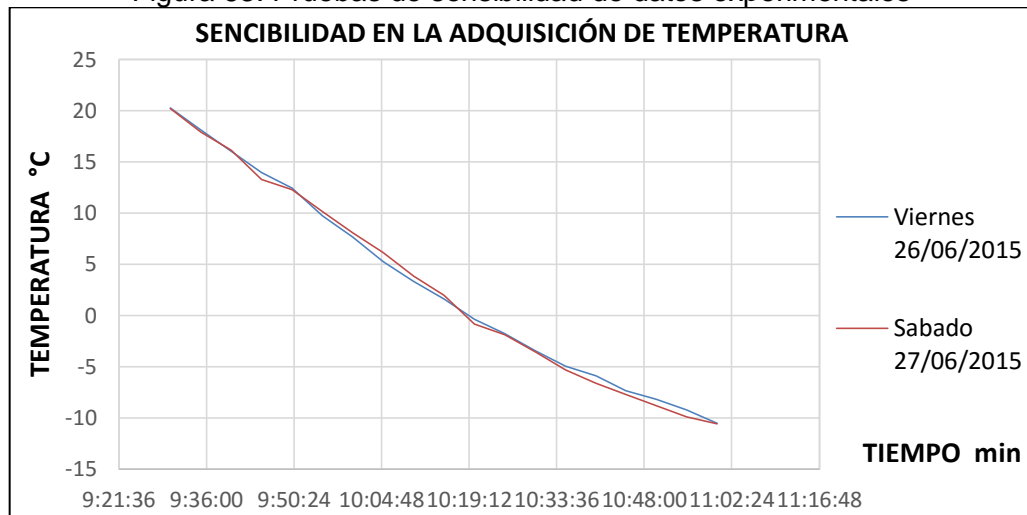
Los resultados de experimentación de datos muestran errores relativos porcentuales menores al 10% lo cual es muy aceptable y unos pequeños errores sistemáticos producidos por la turbulencia dentro del tanque de almacenamiento de la salmuera.

Tabla 22. Prueba de sensibilidad de datos

Tiempo [min]	Viernes 26 Tem[°C]	Sábado 27 Tem[°C]	Er %
9:30:02	20,23	20,19	0,20
9:35:02	18,13	17,90	1,27
9:40:02	16,03	16,13	0,62
9:45:02	13,93	13,30	4,52
9:50:02	12,45	12,26	1,53
9:55:02	9,73	10,16	4,42
10:00:02	7,63	8,06	5,64
10:05:02	5,23	6,16	11,78
10:10:02	3,33	3,86	10,92
10:15:02	1,63	1,96	9,84
10:20:02	-0,37	-0,84	4,31
10:25:02	-1,76	-1,89	7,39
10:30:02	-3,44	-3,57	3,78
10:35:02	-4,98	-5,31	6,63
10:40:02	-5,87	-6,60	12,44
10:45:02	-7,35	-7,70	4,76
10:50:02	-8,17	-8,80	7,71
10:55:02	-9,23	-9,90	7,26
11:00:02	-10,53	-10,60	0,66

Fuente: Autores

Figura 63. Pruebas de sensibilidad de datos experimentales



Fuente: Autores

4.4.2 *Experimentación para concentración del 21% de CaCl₂.* Una vez obtenido la concentración de la solución y determinado que se encuentra con una concentración del 21% se procede a la obtención de datos de caudal, temperatura y tiempo para la

elaboración y análisis de la curva de enfriamiento para dicha concentración. Se los obtiene mediante la estrangulación de la válvula de globo en porcentajes de apertura del 25%, 50%, 75% y 100%. A continuación se presentan los datos de las pruebas realizadas.

4.4.3 Prueba N° 1 estrangulación de la válvula al 25% (21% CaCl₂). Condiciones iniciales para la realización de la prueba:

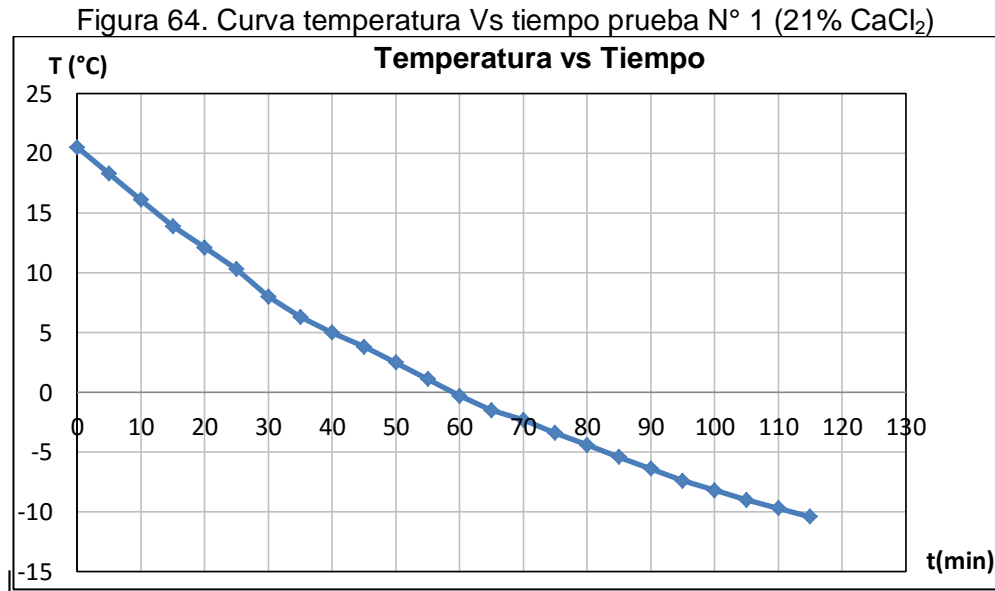
- Hora de la prueba experimental: 14h05min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: T_{α1} = 21,0 °C
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: T_{α2} = 20,5 °C
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

Tabla 23. Datos prueba N° 1 (21% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,50	9,72
5	18,30	9,60
10	16,10	9,48
15	13,90	9,36
20	12,10	9,26
25	10,30	9,15
30	8,00	9,02
35	6,30	8,92
40	5,00	8,84
45	3,80	8,77
50	2,50	8,69
55	1,10	8,61
60	-0,30	8,52
65	-1,50	8,54
70	-2,30	8,49
75	-3,40	8,43
80	-4,40	8,36
85	-5,40	8,30
90	-6,40	8,23
95	-7,40	8,23
100	-8,20	8,22
105	-9,00	8,17
110	-9,70	8,12

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a elaboración de la curva de enfriamiento, para lo cual se realiza la gráfica de la temperatura en función del tiempo y se procede al análisis de su velocidad de enfriamiento como se muestra a continuación.



Fuente: Autores

Gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,50 \text{ °C} - (-10,40 \text{ °C})$$

$$\Delta T = 30,90 \text{ °C}$$

Velocidad de enfriamiento:

$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{enf}} = \frac{30,90 \text{ °C}}{115 \text{ min}}$$

$$V_{\text{enf}} = 0,269 \text{ °C/min}$$

$$V_{\text{enf}} = 16,122 \text{ °C/min}$$

4.4.4 Prueba N° 2 estrangulación de la válvula al 50% (21% CaCl₂). Condiciones iniciales para la realización de la prueba.

- Hora de la prueba experimental: 13h30min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 24,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 20,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

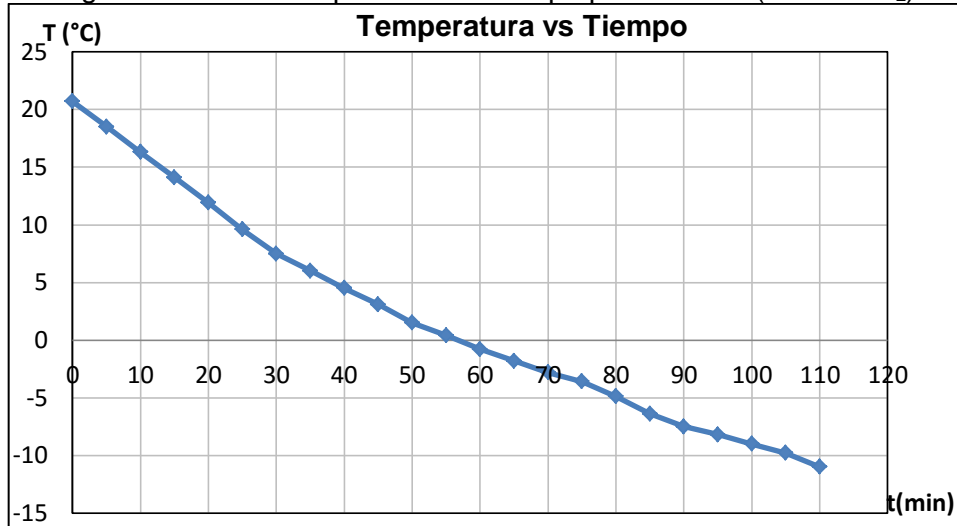
Tabla 24. Datos prueba N° 2 (21% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,70	13,73
5	18,50	13,61
10	16,30	13,79
15	14,10	13,67
20	11,90	13,65
25	9,60	13,51
30	7,50	13,59
35	6,00	13,50
40	4,50	13,41
45	3,10	13,53
50	1,50	13,43
55	0,40	13,36
60	-0,80	13,39
65	-1,80	13,33
70	-2,80	13,26
75	-3,60	13,21
80	-4,90	13,13
85	-6,40	13,03
90	-7,50	12,96
95	-8,20	12,92
100	-9,00	12,87
105	-9,80	12,81
110	-11,00	12,73

Fuente: Autores

A continuación se muestra la gráfica de temperatura en función del tiempo para los datos experimentales obtenidos, en ella se nota principalmente una reducción del tiempo de enfriamiento y por tanto una secuencia de datos más pronunciada para las velocidades medias de transferencia de calor.

Figura 65. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 2 (21% CaCl₂)



Fuente: Autores

Gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,7 \text{ °C} - (-11 \text{ °C})$$

$$\Delta T = 31,7 \text{ °C}$$

Velocidad de enfriamiento calculada a partir del gradiente de temperatura debido a la energía calorífica transferida desde el intercambiador de calor de placas a la solución de cloruro de calcio.

$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{enf}} = \frac{31,7 \text{ °C}}{110 \text{ min}}$$

$$V_{\text{enf}} = 0,288 \text{ °C/min}$$

$$V_{\text{enf}} = 17,291 \text{ °C/h}$$

4.4.5 Prueba N° 3 para estrangulación de la válvula al 75% (21% CaCl₂).

Condiciones iniciales para la realización de la prueba, en este caso se tiene una apertura del 75% de la válvula de globo con una concentración en masa del 21% de

CaCl₂ con lo que se consigue una disminución de la resistencia en masa por cada kilogramo de solución.

- Hora de la prueba experimental: 10h27min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: T_{α1} = 20,00 °C
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: T_{α2} = 20,37 °C
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

Tabla 25. Datos prueba N° 3 (21% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,37	18,71
5	18,17	18,72
10	15,97	18,71
15	13,97	18,71
20	11,77	18,64
25	9,77	18,58
30	7,67	18,46
35	5,97	18,36
40	4,27	18,35
45	2,37	18,34
50	0,47	18,23
55	-1,23	18,12
60	-2,63	18,03
65	-4,03	17,95
70	-5,13	17,88
75	-6,23	17,81
80	-7,23	17,74
85	-8,13	17,68
90	-8,93	17,63
95	-9,83	17,57
100	-10,73	17,51

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos se procede a la elaboración de la curva de enfriamiento graficando temperatura vs tiempo para una concentración del 21%

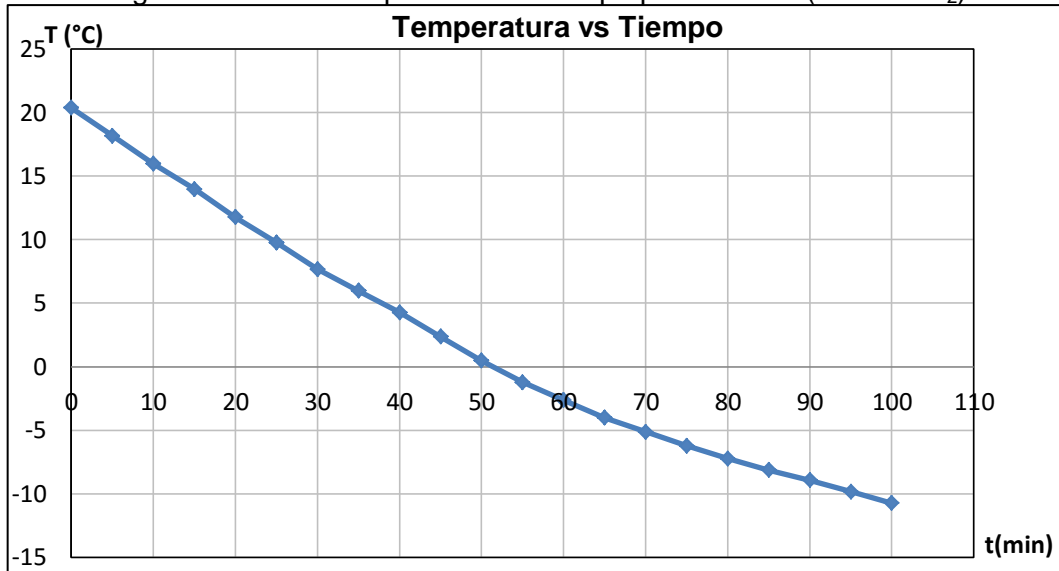
Gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,37 \text{ }^\circ\text{C} - (-10,73 \text{ }^\circ\text{C})$$

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

Figura 66. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 3 (21% CaCl₂)



Fuente: Autores

Velocidad de enfriamiento:

$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{enf}} = \frac{31,10 \text{ }^\circ\text{C}}{100 \text{ min}}$$

$$V_{\text{enf}} = 0,311 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$$

$$V_{\text{enf}} = 18,66 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$$

4.4.6 Prueba N° 4 para estrangulación de la válvula al 100% (21% CaCl₂).

Condiciones iniciales para la realización de la prueba, en este caso se tiene una apertura del 75% de la válvula de globo con una concentración en masa del 21%.

- Hora de la prueba experimental: 09h30min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: T_{α1} = 19,00 °C
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: T_{α2} = 20,23 °C
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

Tabla 26. Datos prueba N° 4 (21% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,23	23,01
5	18,13	22,91
10	16,03	22,80
15	13,93	22,81
20	11,83	22,69
25	9,73	22,68
30	7,63	22,56
35	5,53	22,44
40	3,33	22,30
45	1,63	22,20
50	-0,37	22,08
55	-1,77	21,73
60	-3,47	21,62
65	-4,97	21,53
70	-6,27	21,44
75	-7,37	21,37
80	-8,47	21,30
85	-9,57	21,23
90	-10,57	21,16

Fuente: Autores

A continuación se grafica las curvas de enfriamientos de temperatura vs tiempo con los datos obtenidos en la adquisición de datos, se nota un acortamiento del tiempo total para llegar a los -10 °C con estimaciones sistemáticas de experimentación en errores porcentuales que no superan el 10% de dispersión en la coherencia de la tendencia de las curvas dentro de lo normal.

Gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,23 \text{ °C} - (-10,57 \text{ °C})$$

$$\Delta T = 30,80 \text{ °C}$$

Velocidad de enfriamiento para una total apertura de la válvula de paso que indica la mejor eficiencia del equipo de bombeo a esta concentración.

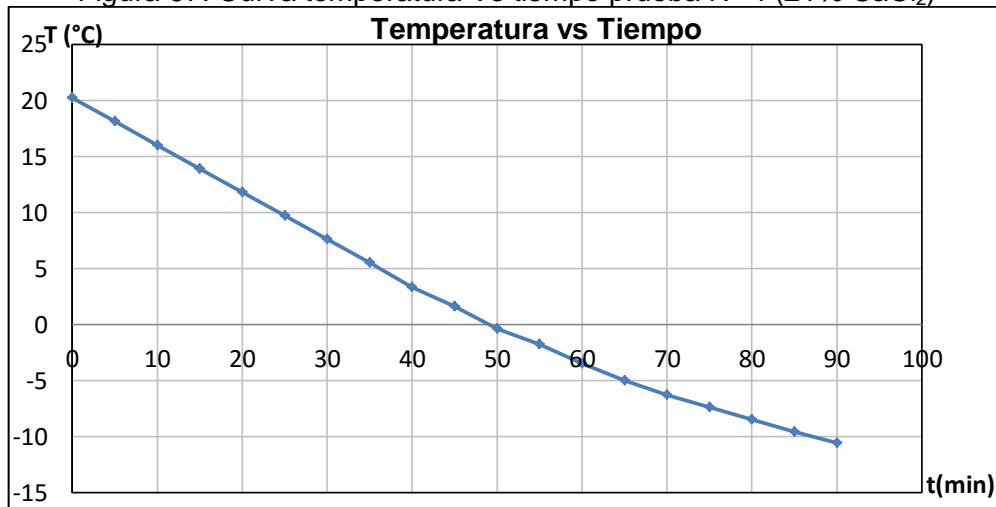
$$V_{enf} = \frac{\Delta T}{t_{total}}$$

$$V_{enf} = \frac{30,80 \text{ }^{\circ}\text{C}}{90 \text{ min}}$$

$$V_{enf} = 0,342 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$V_{enf} = 20,533 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

Figura 67. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 4 (21% CaCl₂)



Fuente: Autores

4.4.7 *Resultados de las pruebas para concentración del 21% CaCl₂.* Una vez realizadas las pruebas para las estrangulaciones de la válvula mediante el servomotor, el cual permite tener un rango diferente de caudal se procede al análisis de los resultados. Se analiza las velocidades de enfriamiento y de las regiones de las curvas de enfriamiento.

A continuación se detallan los resultados de las pruebas realizadas para el 21% de CaCl₂, se estima las velocidades de enfriamiento promedio.

Tabla 27. Resultados de pruebas al 21% CaCl₂

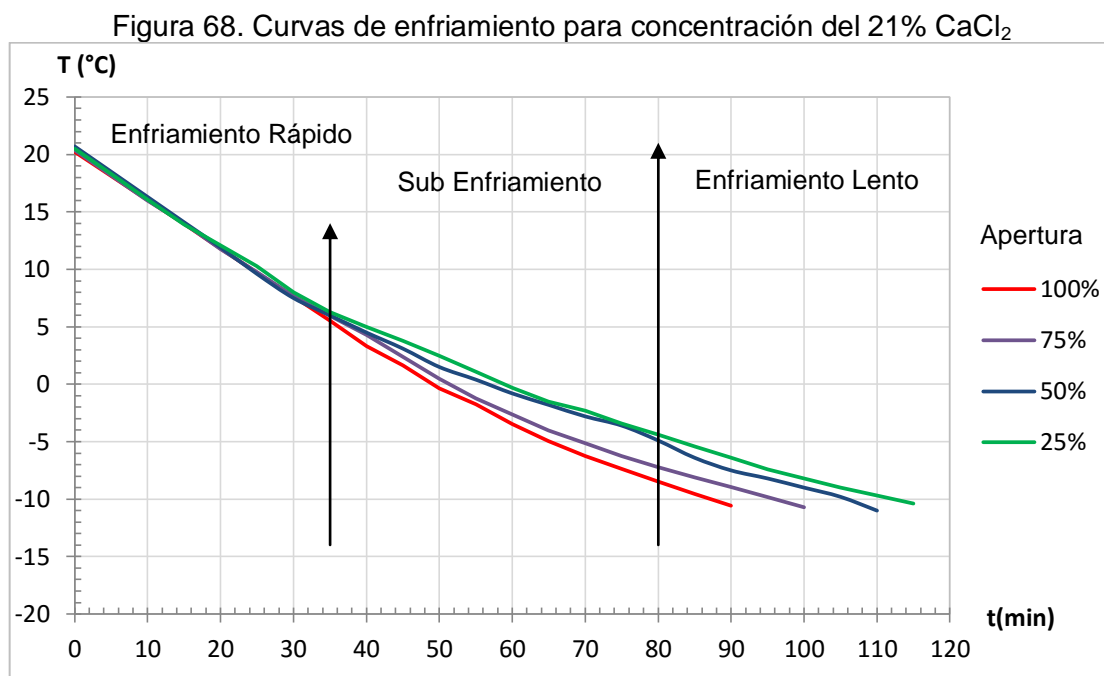
N° Prueba	Apertura	Q [l/min]	ΔT [°C]	t _{total} [min]	V _{enf} [°C/min]	V _{enf} [°C/h]
1	25%	9,72	30,90	115	0,269	16,122
2	50%	13,73	31,70	110	0,288	17,291
3	75%	18,71	31,10	100	0,311	18,660
4	100%	23,01	30,80	90	0,342	20,533

Fuente: Autores

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 26 se puede concluir que la velocidad de enfriamiento para la salmuera depende de la variación del caudal por la estrangulación de la válvula, debido a una menor transferencia de calor en el intercambiador de placas. Se puede notar que a medida que aumenta el caudal mayor es la velocidad de enfriamiento, esto influye en el tiempo total necesario para lograr la temperatura deseada, por consiguiente un menor esfuerzo del equipo.

Para un funcionamiento eficiente del equipo se puede notar una mayor velocidad de enfriamiento de 20,533 °C/h para la máxima apertura de la válvula de globo, correspondiendo a un caudal de 23,01 l/min en un tiempo aproximado de 90 minutos de funcionamiento del equipo.

4.4.8 *Análisis de las regiones en las curvas de enfriamiento (21% CaCl₂).* En las curvas de enfriamiento se distinguen tres regiones primero una región de un enfriamiento rápido donde el descenso de temperatura es acelerado, luego una región de un sub enfriamiento aquí la temperatura desciende por debajo de los 0 °C y continua su descenso a una región de un enfriamiento lento donde se tarda un mayor tiempo en alcanzar temperaturas menores a los -10 °C.



Fuente: Autores

Para análisis congruente se realiza una extrapolación de las curvas de enfriamiento con el fin de partir de una misma temperatura inicial del cloruro de calcio, datos que fueron obtenidos por el cálculo de las velocidades de enfriamiento por regiones de

cada curva respectivamente. A continuación se muestra un resumen de estas curvas y las regiones analizadas. Para mayor comprensión del comportamiento de estas curvas es necesario el cálculo de las velocidades de enfriamiento en cada región, datos resumidos en la siguiente tabla:

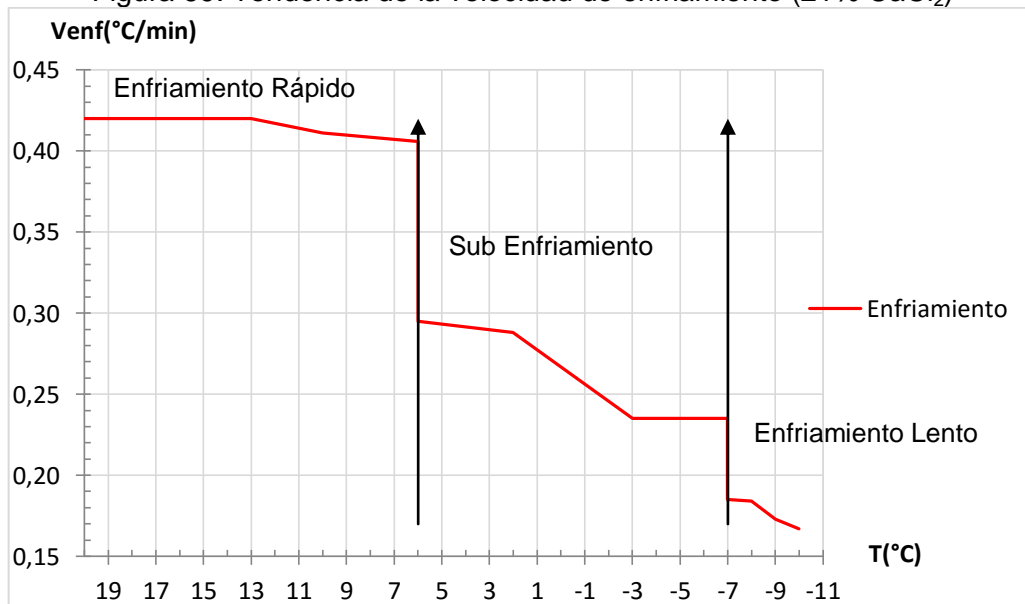
Tabla 28. Velocidades de enfriamiento por regiones 21% CaCl₂

		Enfriamiento rápido	Sub enfriamiento	Enfriamiento lento
Apertura	Caudal(L/min)	Venf [°C/min]	Venf [°C/min]	Venf [°C/min]
25%	9,72	0,406	0,235	0,167
50%	13,73	0,420	0,235	0,184
75%	18,71	0,411	0,288	0,173
100%	23,01	0,420	0,295	0,200
Velocidad promedio		0,414	0,263	0,181

Fuente: Autores.

En la primera zona de enfriamiento rápido se observa un comportamiento similar para todos los caudales suministrados por la bomba de recirculación, teniendo un valor promedio de 0,414 °C/min.

Figura 69. Tendencia de la velocidad de enfriamiento (21% CaCl₂)



Fuente: Autores

Al pasar a la zona de sub enfriamiento donde se logra temperaturas por debajo de cero grados centígrados, se observa que la velocidad de enfriamiento de la salmuera es mayor para las aperturas del 75% y 100% de la válvula para los caudales de 18,71 l/min y 23,01 l/min correspondientemente. Al igual que la primera zona en la zona de

enfriamiento lento los valores de las velocidades están en un rango no muy distanciado obteniendo un valor promedio de 0,263 °C/min.

Además, en la adquisición de los datos experimentales se observa el apareamiento de escarcha en la superficie del intercambiador a partir de los cinco grados centígrados coincidiendo con el cambio de zona de enfriamiento rápido a sub enfriamiento que corresponde un tiempo aproximado de 35 minutos de funcionamiento como se indica en la figura 70.

En cambio se observa un gran congelamiento del intercambiador y del condensador del refrigerante de la unidad condensadora a partir de los 80 minutos de funcionamiento que corresponde el cambio de zona de sub enfriamiento a enfriamiento lento como se indica en la figura 71.

Figura 70. Congelamiento inicial del intercambiador de calor



Fuente: Autores

Figura 71. Congelamiento del intercambiador de calor

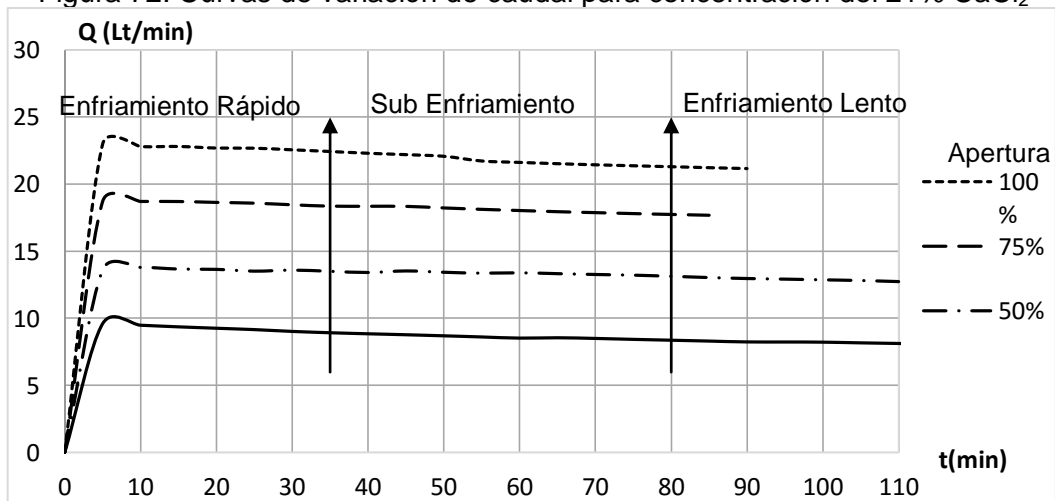


Fuente: Autores

Debido a la notable disminución del área de transferencia de calor por aleta del intercambiador por congelamiento de la superficie externa la velocidad de enfriamiento se reduce hasta un valor aproximado de 0,181 °C/min.

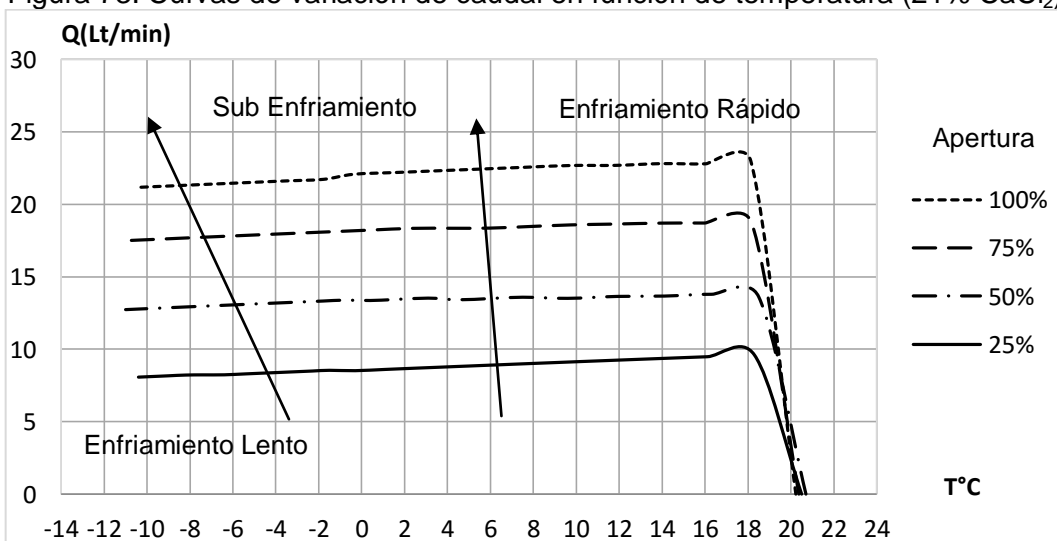
4.4.9 *Análisis de la variación de caudal en las curvas (21% CaCl₂).* A continuación se trazan las curvas de enfriamiento en función del caudal de bombeo y el tiempo de adquisición, se notan leves descensos de caudal provocados por el cambio de densidad por el enfriamiento, se detallara un análisis de densidad más adelante. El cambio de los puntos de operación de la motobomba provoca grandes cambios en el caudal de bombeo como se esperaba notándose una reducción de 23,01 l/min con la apertura máxima a 9,72 l/min a una apertura del 25%.

Figura 72. Curvas de variación de caudal para concentración del 21% CaCl₂



Fuente: Autores.

Figura 73. Curvas de variación de caudal en función de temperatura (21% CaCl₂)



Fuente: Autores.

En la figura 73 se trazó las gráficas de caudal Q en función de la temperatura, se aprecia mejor un descenso del caudal de bombeo por el enfriamiento porque además de la densidad la transferencia de calor es afectada también por el cambio del calor específico del cloruro de calcio CaCl_2 .

4.4.10 *Experimentación para concentración del 30% de CaCl_2 .* Determinado anteriormente el cálculo de las concentraciones del Cloruro de calcio se procede a realizar las pruebas, teniendo en cuenta que el cambio de densidad del mismo provoca un mayor esfuerzo en el equipo de recirculación. Se realizan cuatro pruebas para la obtención de las curvas de enfriamiento mediante la apertura del 25%, 50%, 75% y 100% de la válvula con el fin de realizar un análisis comparativo.

4.4.11 *Prueba N° 5 estrangulación de la válvula al 25% (30% CaCl_2)*

Condiciones iniciales para la realización de la prueba:

- Hora de la prueba experimental: 13h00min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 21,00 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 20,98 \text{ }^\circ\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

En la Figura 74 se representa la curva de enfriamiento para una concentración del 30% de CaCl_2 y una apertura del 25%. Inicialmente se nota el decremento del caudal de funcionamiento a 6,58 l/min muy inferior al obtenido anteriormente.

Con esto se ratifica la conclusión de una mayor entrega de energía del equipo al cloruro de calcio CaCl_2 por la variación de calor específico, el tiempo necesario para llegar a los $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ es de alrededor de 160 min que es exagerado, además el equipo es totalmente ineficiente a esta apertura con el caudal de suministro de 6,58 l/min.

Gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,98 \text{ }^\circ\text{C} - (-10,01 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$\Delta T = 30,99 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tabla 29. Datos prueba N° 5 (30% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,98	6,85
5	19,30	6,76
10	17,75	6,68
15	16,28	6,60
20	14,95	6,52
25	13,79	6,51
30	12,50	6,49
35	11,46	6,43
40	10,66	6,38
45	9,45	6,31
50	8,46	6,25
55	7,17	6,18
60	6,26	6,12
65	5,31	6,07
70	4,25	6,00
75	3,61	5,87
80	2,65	5,81
85	1,17	5,72
90	0,52	5,68
95	-0,30	5,63
100	-1,02	5,58
105	-1,57	5,55
110	-2,39	5,50
115	-3,42	5,43
120	-4,24	5,38
125	-4,91	5,34
130	-5,35	5,31
135	-6,07	5,26
140	-6,91	5,21
145	-7,83	5,15
150	-8,85	5,08
155	-9,19	5,06

Fuente: Autores

Velocidad de enfriamiento:

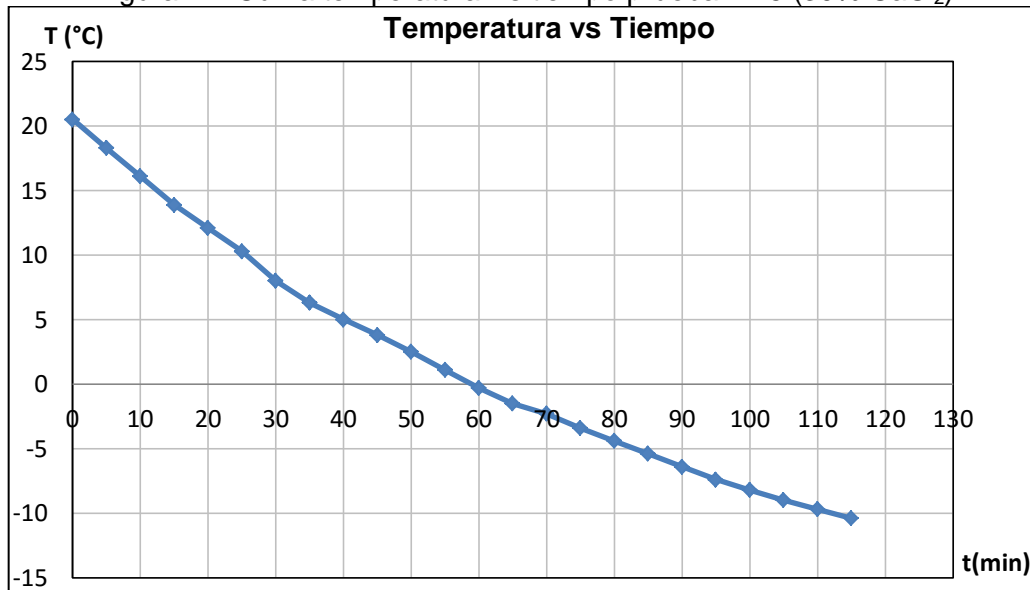
$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{enf} = \frac{30,99 \text{ }^{\circ}\text{C}}{160 \text{ min}}$$

$$V_{enf} = 0,194 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$V_{enf} = 11,621 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

Figura 74. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 5 (30% CaCl₂)



Fuente: Autores

El análisis de resultados de la prueba 5 con una estrangulación del 25% indica que el funcionamiento del equipo de refrigeración es desfavorable con un drástico descenso en la eficiencia de la unidad condensadora por el incremento del tiempo.

Además durante la experimentación se notó que el equipo trabaja con sobre esfuerzo razón por la cual se tuvo que acondicionar un ventilador extra para evitar el sobrecalentamiento de la motobomba JET, cabe recalcar que para llegar a -10 °C en estas condiciones el equipo tardó 160 min lo cual es excedente.

4.4.12 Prueba N° 6 para estrangulación de la válvula al 50% (30% CaCl₂).

Condiciones iniciales para la realización de la prueba:

- Hora de la prueba experimental: 15h00min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 24,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 20,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

Tabla 30. Datos prueba N° 6 (30% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,33	10,82
5	18,92	10,83
10	17,24	10,82
15	16,09	10,82
20	14,95	10,80
25	13,11	10,62
30	11,83	10,55
35	10,77	10,49
40	9,76	10,43
45	8,25	10,11
50	7,37	10,17
55	6,43	10,14
60	5,10	10,10
65	3,92	10,05
70	3,06	10,02
75	2,04	9,98
80	1,02	9,94
85	-0,24	9,89
90	-1,01	9,86
95	-2,18	9,80
100	-3,35	9,75
105	-4,42	9,70
110	-5,02	9,60
115	-5,87	9,56
120	-6,39	9,54
125	-7,28	9,49
130	-8,08	9,45
135	-8,74	9,42
140	-9,42	9,38
145	-10,10	9,34

Fuente: Autores

Gradiente de temperatura para la prueba número 6 con una estrangulación del 50% de la válvula de compuerta y una concentración de 30% de CaCl₂:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

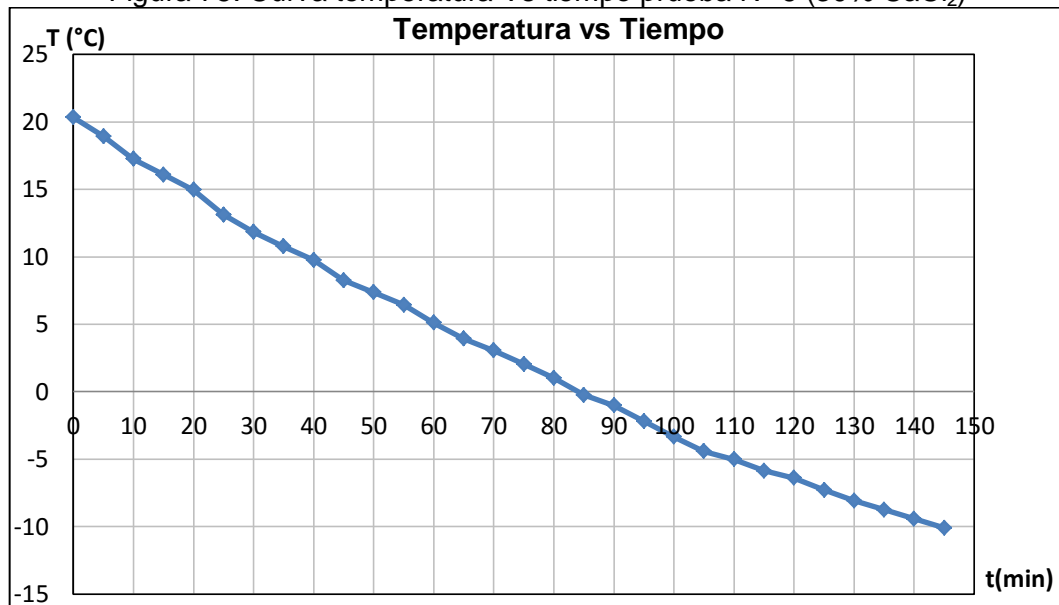
$$\Delta T = 20,33 \text{ °C} - (-10,10 \text{ °C})$$

$$\Delta T = 30,43 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Como se esperaba hay un cambio significativo de caudal debido al cambio de composición de CaCl_2 lo que se traduce en una extensión de tiempo para trazado de la curva hasta los $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

A partir de los datos obtenidos anteriormente se procede a elaboración de la curva de enfriamiento, para lo cual se realiza la gráfica de la temperatura en función del tiempo.

Figura 75. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 6 (30% CaCl_2)



Fuente: Autores

Velocidad de enfriamiento:

$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{enf}} = \frac{30,43 \text{ }^{\circ}\text{C}}{145 \text{ min}}$$

$$V_{\text{enf}} = 0,209 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$V_{\text{enf}} = 12,591 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

4.4.13 Prueba N° 7 para estrangulación de la válvula al 75% (30% CaCl_2).

Condiciones iniciales para la realización de la prueba:

- Hora de la prueba experimental: 11h00min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 21,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 20,34 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

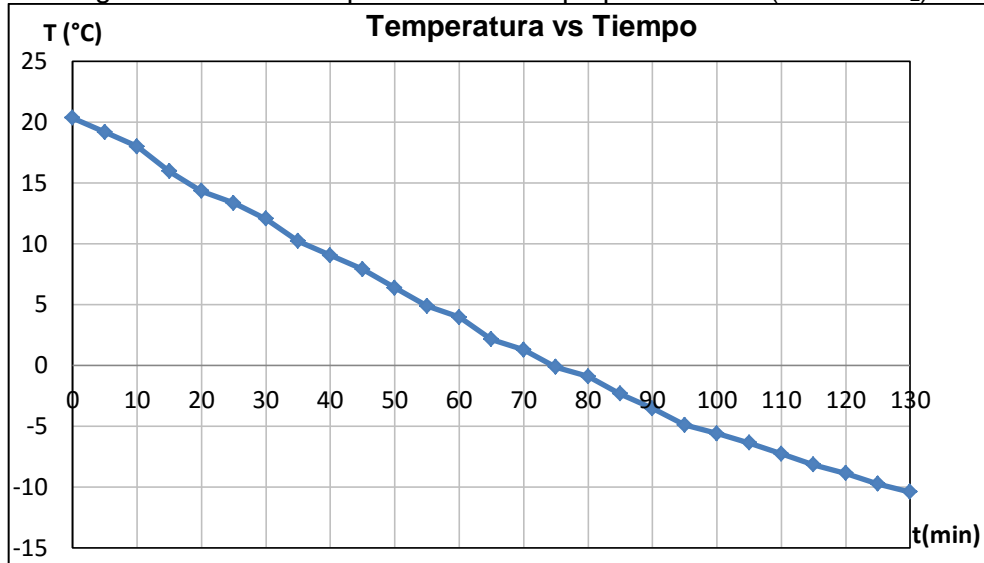
Tabla 31. Datos prueba N° 7 (30% CaCl_2)

Tiempo [min]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Caudal [l/min]
0	20,34	15,82
5	19,18	15,81
10	17,99	15,79
15	15,94	15,68
20	14,33	15,59
25	13,33	15,53
30	12,05	15,46
35	10,21	15,36
40	9,05	15,27
45	7,89	15,24
50	6,37	15,19
55	4,88	15,13
60	3,95	15,10
65	2,14	15,03
70	1,27	14,90
75	-0,14	14,84
80	-0,91	14,81
85	-2,33	14,74
90	-3,55	14,59
95	-4,90	14,53
100	-5,60	14,49
105	-6,37	14,45
110	-7,27	14,41
115	-8,17	14,02
120	-8,87	13,96
125	-9,76	13,89
130	-10,41	13,83

Fuente: Autores

La Figura 76 representa la curva de enfriamiento, en la cual se grafica temperatura vs tiempo para una concentración en masa del cloruro de calcio CaCl_2 del 30% con una apertura del 75% de la válvula de compuerta para el paso de flujo.

Figura 76. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 7 (30% CaCl₂)



Fuente: Autores

Gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,34 \text{ °C} - (-10,41 \text{ °C})$$

$$\Delta T = 30,75 \text{ °C}$$

Velocidad de enfriamiento:

$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{enf}} = \frac{30,75 \text{ °C}}{130 \text{ min}}$$

$$V_{\text{enf}} = 0,237 \text{ °C/min}$$

$$V_{\text{enf}} = 14,192 \text{ °C/h}$$

4.4.14 Prueba N° 8 para estrangulación de la válvula al 100% (30% CaCl₂).

Condiciones iniciales para la realización de la prueba:

- Hora de la prueba experimental: 08h20min

- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 19,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 20,34 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

Tabla 32. Datos prueba N° 8 (30% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,34	21,15
5	18,97	21,10
10	17,49	21,04
15	15,37	21,15
20	14,03	21,09
25	12,43	21,02
30	11,10	20,96
35	9,36	20,87
40	8,25	20,45
45	7,03	20,41
50	5,37	20,35
55	4,03	20,30
60	2,88	20,26
65	1,34	20,20
70	0,44	20,16
75	-1,15	20,10
80	-2,35	19,97
85	-3,47	19,89
90	-4,92	19,78
95	-5,70	19,72
100	-6,40	19,66
105	-7,80	19,55
110	-8,70	19,47
115	-9,60	19,40
120	-10,30	19,34

Fuente: Autores

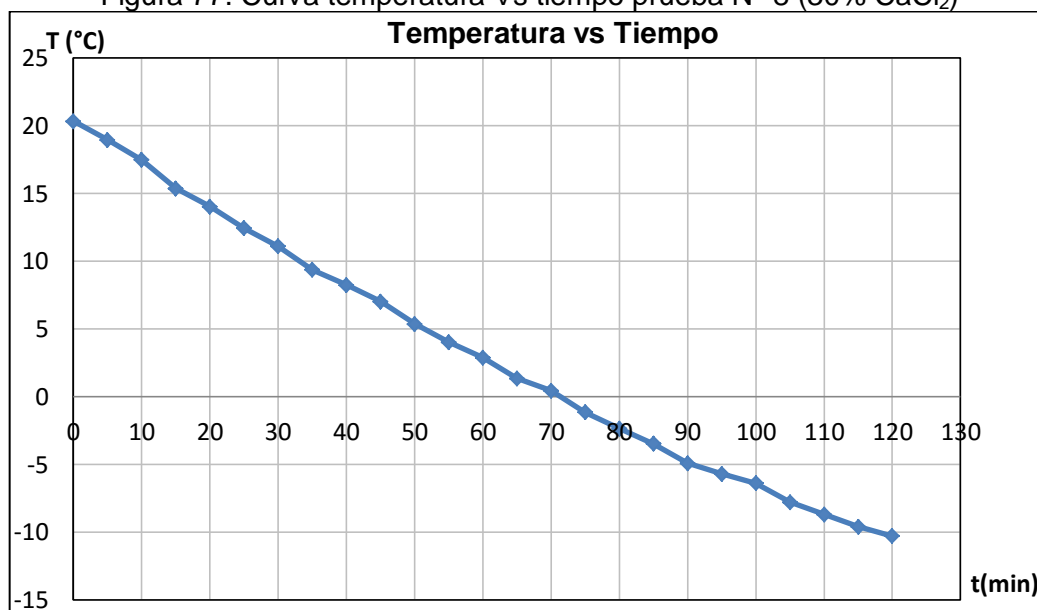
A partir de los datos obtenidos se elabora la curva de enfriamiento y se calcula el gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,34 \text{ }^{\circ}\text{C} - (-10,30 \text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$\Delta T = 30,64 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Figura 77. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 8 (30% CaCl₂)



Fuente: Autores

Velocidad de enfriamiento:

$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{enf}} = \frac{30,64 \text{ }^{\circ}\text{C}}{120 \text{ min}}$$

$$V_{\text{enf}} = 0,255 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

4.4.15 *Resultados de las pruebas para concentración del 30% CaCl₂.* Una vez realizadas las pruebas para las estrangulaciones de la válvula que se mencionaron anteriormente, se procede al análisis de los resultados y de las regiones de las curvas, a continuación se detallan los resultados de las pruebas realizadas.

Tabla 33. Resultados de pruebas al 30% CaCl₂

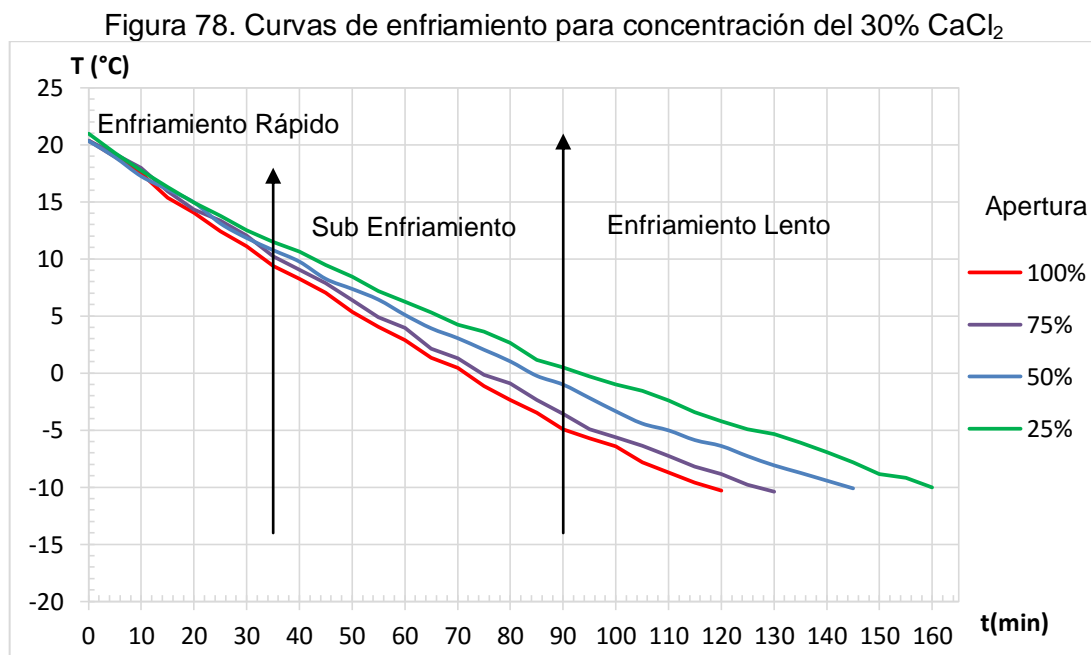
N° Prueba	Apertura	Q [l/min]	ΔT [°C]	V _{enf} [°C/min]	V _{enf} [°C/h]	t _{total} [min]
5	25%	6,85	30,99	0,194	11,621	160
6	50%	10,82	30,43	0,210	12,592	145
7	75%	15,82	30,75	0,237	14,192	130
8	100%	21,15	30,64	0,255	15,320	120

Fuente: Autores

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 33 se puede concluir que la velocidad de enfriamiento para la salmuera depende de la apertura de la válvula por consiguiente del caudal que se suministra al equipo.

4.4.16 *Análisis de las regiones en las curvas de enfriamiento (30% CaCl₂).* En las curvas de enfriamiento se distinguen tres regiones primero una región de un enfriamiento rápido donde el descenso de temperatura es acelerado, luego una región de un sub enfriamiento aquí la temperatura desciende por debajo de los 0 °C y continua su descenso a una región de un enfriamiento lento donde se tarda un mayor tiempo en alcanzar temperaturas menores a los -10 °C.

A continuación se muestra un resumen de estas curvas analizando cada una de las regiones establecidas por la congruencia de datos experimentales notándose una gran dispersión de datos para el enfriamiento lento.



Fuente: Autores

A esta concentración principalmente se nota el gran incremento del tiempo con una consecuente disminución de temperatura y por ende una velocidad de enfriamiento para transferencia de energía más pobre en comparación con la anterior concentración de 21% de CaCl₂. De la tabla de resumen siguiente podemos notar que para la concentración del 30% de CaCl₂, el caudal óptimo para disminuir el tiempo y la velocidad de enfriamiento es de 100% de apertura de la válvula, logrando llegar a la temperatura de -10 °C en aproximadamente 120 minutos.

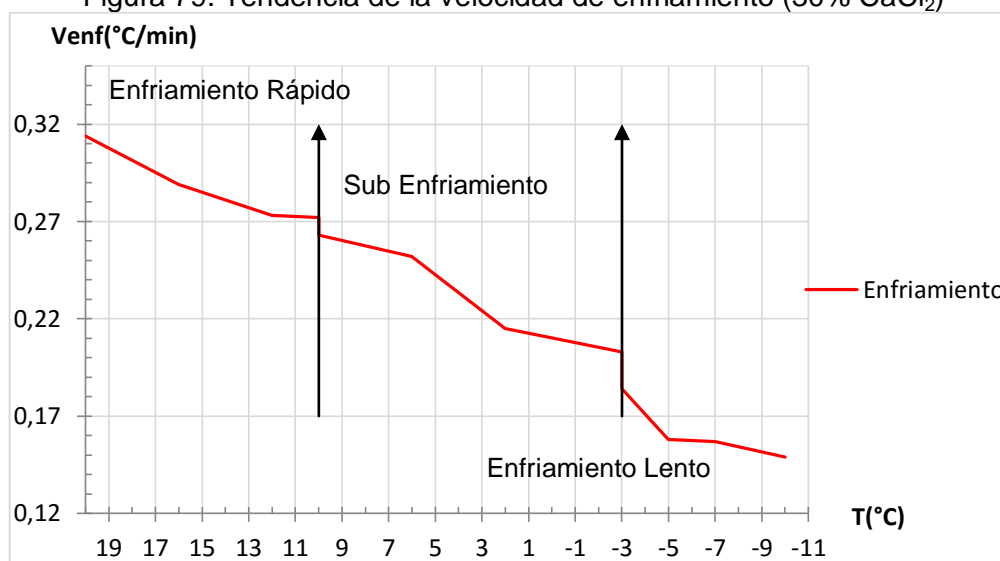
Tabla 34. Velocidades de enfriamiento por regiones 30% CaCl₂

Variación de flujo		Enfriamiento rápido	Sub enfriamiento	Enfriamiento lento
Apertura	Caudal [l/min]	Venf [°C/min]	Venf [°C/min]	Venf [°C/min]
25%	6,854	0,272	0,203	0,149
50%	10,819	0,273	0,215	0,158
75%	15,819	0,289	0,252	0,157
100%	21,154	0,314	0,263	0,184
Velocidad promedio		0,287	0,233	0,162

Fuente: Autores.

Además se aprecia que al estrangular la válvula y disminuir el caudal al equipo en un 25% no solamente se fuerza al equipo sino que tarda más tiempo en lograr la temperatura de -10 °C. Lo que implica un aumento considerable en la resistencia del flujo masa, las características de la curvas por regiones es de tipo escalonado.

Figura 79. Tendencia de la velocidad de enfriamiento (30% CaCl₂)

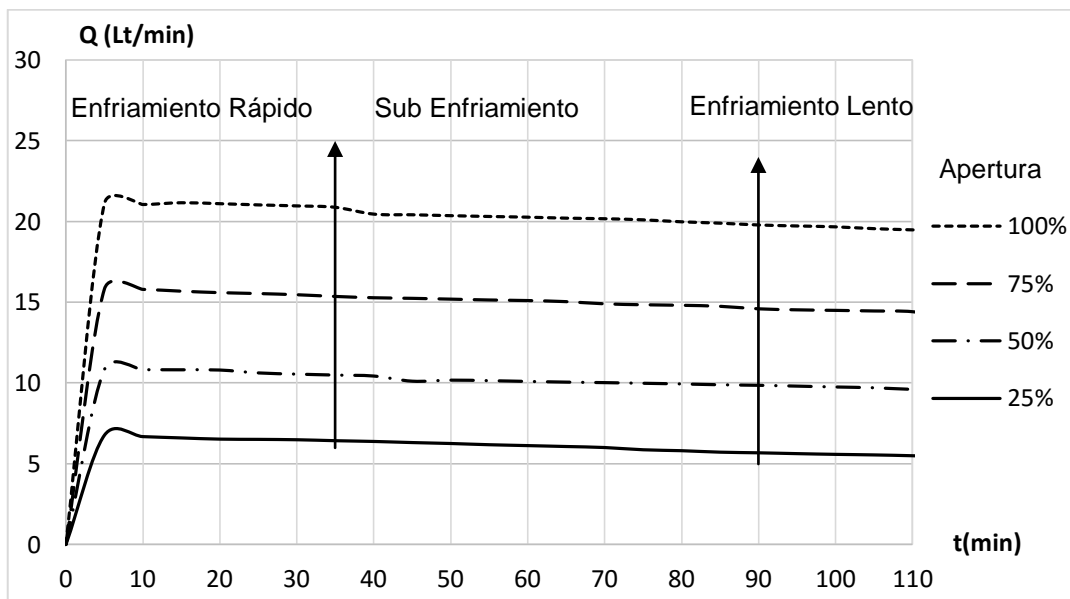


Fuente: Autores

Su velocidad de enfriamiento es demasiado pobre debido al gran tiempo que toma el proceso provocando un mayor congelamiento del intercambiador de calor por ende una transferencia de calor deficiente. Como se puede apreciar en la gráfica de enfriamiento de una concentración para el 30%, la velocidad decrece en forma severa continuamente en todas las zonas.

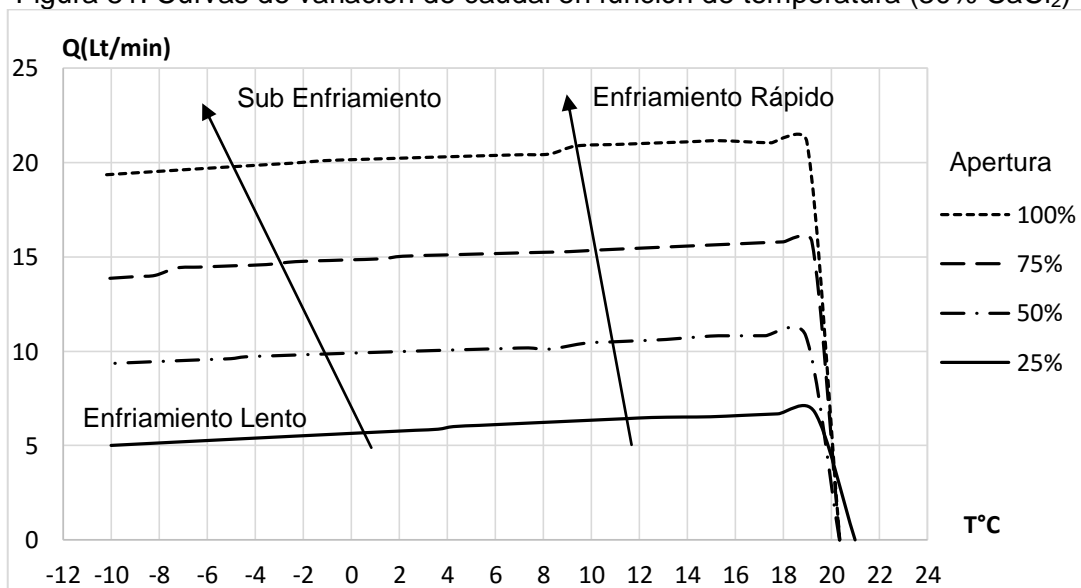
4.4.17 *Análisis de la variación de caudal en las curvas de enfriamiento (30% CaCl₂).* El descenso de caudal por el cambio de densidad por el enfriamiento es mucho más notorio que a una concentración del 21%

Figura 80. Curvas de variación de caudal para concentración del 30% CaCl_2



Fuente: Autores.

Figura 81. Curvas de variación de caudal en función de temperatura (30% CaCl_2)



Fuente: Autores.

4.4.18 *Experimentación para concentración del 15% de CaCl_2 .* Una vez obtenido la concentración de la solución y determinado mediante análisis químicos que se encuentra con una concentración del 15% se procede a la obtención de datos de caudal, temperatura y tiempo para la elaboración y análisis de la curva de enfriamiento para dicha concentración.

4.4.19 *Prueba N° 9 para estrangulación de la válvula al 25% (15% CaCl_2).* Condiciones iniciales para la realización de la prueba:

- Hora de la prueba experimental: 13h05min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 21,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 20,37 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

Tabla 35. Datos prueba N° 9 (15% CaCl_2)

Tiempo [min]	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Caudal [l/min]
0	20,37	9,73
5	18,64	9,69
10	16,96	9,66
15	15,07	9,62
20	13,26	9,57
25	11,45	9,52
30	9,81	9,48
35	7,93	9,42
40	6,52	9,37
45	4,88	9,31
50	3,23	9,25
55	1,81	9,20
60	0,21	9,13
65	-0,94	9,08
70	-2,12	9,03
75	-3,13	8,99
80	-4,29	8,93
85	-5,36	8,88
90	-6,55	8,82
95	-7,71	8,77
100	-8,71	8,71
105	-9,52	8,67
110	-10,21	8,63

Fuente: Autores

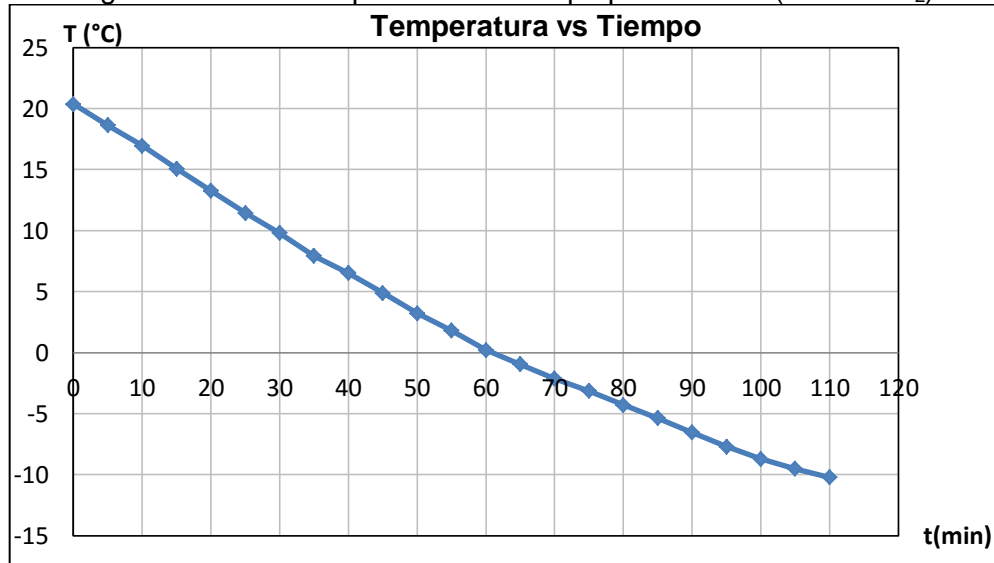
Con los datos obtenidos anteriormente se procede a elaboración de la curva de enfriamiento y el cálculo del gradiente de temperatura para una estrangulación del 25% y una concentración en masa del 15% de CaCl_2 .

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,37 \text{ }^{\circ}\text{C} - (-10,21 \text{ }^{\circ}\text{C})$$

$$\Delta T = 30,58 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Figura 82. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 9 (15% CaCl₂)



Fuente: Autores

Velocidad de enfriamiento:

$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{enf}} = \frac{30,58 \text{ }^{\circ}\text{C}}{110 \text{ min}}$$

$$V_{\text{enf}} = 0,278 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$V_{\text{enf}} = 16,680 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

4.4.20 Prueba N° 10 para estrangulación de la válvula al 50% (15% CaCl₂).

Condiciones iniciales para la realización de la prueba:

- Hora de la prueba experimental: 14h15min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 24,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 20,13 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

En la figura 83 se representa la curva de enfriamiento para una concentración del 15% de CaCl₂ a una apertura del 50% notando una gran variación en el tiempo total.

Tabla 36. Datos prueba N° 10 (15% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,13	14,05
5	18,04	14,01
10	16,21	13,97
15	14,46	13,93
20	12,75	13,89
25	11,02	13,84
30	9,11	13,78
35	7,21	13,72
40	5,27	13,65
45	3,77	13,60
50	1,62	13,52
55	0,28	13,46
60	-0,91	13,41
65	-2,34	13,35
70	-3,60	13,29
75	-4,93	13,23
80	-5,91	13,18
85	-6,82	13,14
90	-8,14	13,07
95	-8,99	13,03
100	-9,85	12,98
105	-10,82	12,93

Fuente: Autores

Gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,13 \text{ °C} - (-10,82 \text{ °C})$$

$$\Delta T = 30,85 \text{ °C}$$

Velocidad de enfriamiento para una estrangulación del 50% de la válvula de compuerta y una composición en masa del 15% de CaCl₂:

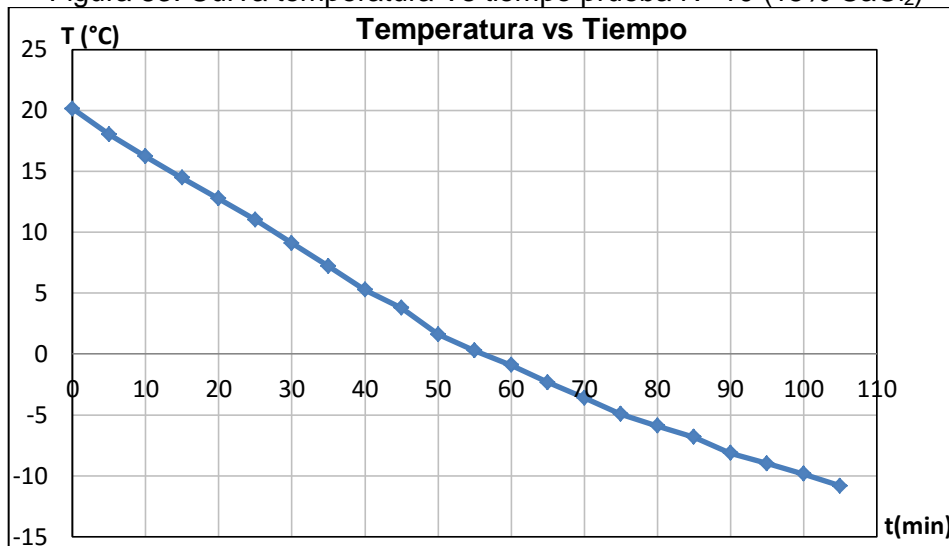
$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{enf} = \frac{30,95 \text{ }^{\circ}\text{C}}{105 \text{ min}}$$

$$V_{enf} = 0,295 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$V_{enf} = 17,686 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

Figura 83. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 10 (15% CaCl₂)



Fuente: Autores

4.4.21 Prueba N° 11 para estrangulación de la válvula al 75% (15% CaCl₂). Condiciones iniciales para la realización de la prueba N°11 con una apertura del 75% y eficiencia del equipo de bombeo del 60% lo que incrementa la eficiencia en la transferencia de energía de la unidad condensadora al cloruro de calcio.

- Hora de la prueba experimental: 10h20min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: $T_{\alpha 1} = 21,00 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: $T_{\alpha 2} = 20,44 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

A partir de los datos obtenidos se procede a elaboración de la curva de enfriamiento graficando temperatura vs tiempo y se calcula el gradiente de temperatura como se muestra a continuación.

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,44 \text{ }^{\circ}\text{C} - (-10,68 \text{ }^{\circ}\text{C})$$

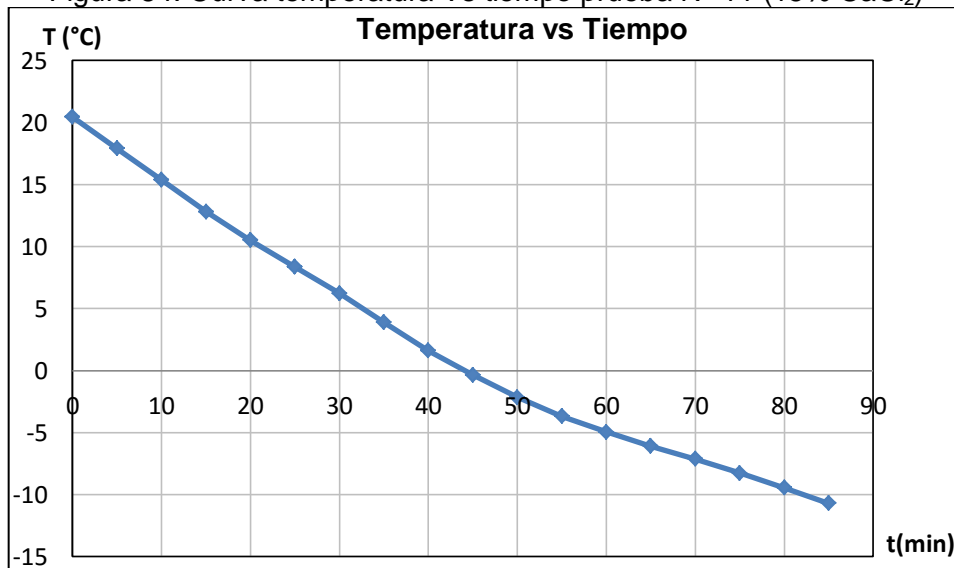
$$\Delta T = 31,12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tabla 37. Datos prueba N° 11 (15% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,44	21,49
5	17,92	21,45
10	15,37	21,40
15	12,81	21,34
20	10,52	21,27
25	8,37	21,21
30	6,23	21,13
35	3,89	21,05
40	1,62	20,99
45	-0,35	20,86
50	-2,15	20,74
55	-3,69	20,64
60	-4,95	20,55
65	-6,08	20,46
70	-7,12	20,54
75	-8,25	20,47
80	-9,45	20,40
85	-10,68	20,33

Fuente: Autores

Figura 84. Curva temperatura Vs tiempo prueba N° 11 (15% CaCl₂)



Fuente: Autores

Cálculo de la velocidad de enfriamiento para un estrangulación del 75%.

$$V_{enf} = \frac{\Delta T}{t_{total}}$$

$$V_{enf} = \frac{31,12 \text{ }^{\circ}\text{C}}{85 \text{ min}}$$

$$V_{enf} = 0,366 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$V_{enf} = 21,967^{\circ}\text{C}/\text{h}$$

4.4.22 Prueba N° 12 para estrangulación de la válvula al 100% (15% CaCl₂). Se muestra las condiciones iniciales para la realización de la prueba a la máxima apertura en el paso del flujo másico.

- Hora de la prueba experimental: 11h40min
- Temperatura del ambiente convectivo del laboratorio: T_{α1} = 19,00 °C
- Temperatura del cloruro de calcio disuelto en salmuera: T_{α2} = 20,34 °C
- Volumen de recirculación de salmuera: 218 l

Tabla 38. Datos prueba N° 12 (15% CaCl₂)

Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Caudal [l/min]
0	20,34	25,49
5	17,62	25,44
10	15,05	25,38
15	12,58	25,32
20	10,22	25,25
25	8,05	25,18
30	5,97	25,11
35	3,49	25,02
40	1,12	24,93
45	-0,95	24,84
50	-2,86	24,76
55	-4,38	24,69
60	-5,68	24,63
65	-6,70	24,58
70	-8,02	24,51
75	-9,17	24,45
80	-10,43	24,38

Fuente: Autores

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a elaboración de la curva de enfriamiento, para lo cual se realiza la gráfica de la temperatura vs del tiempo para la máxima apertura de la válvula de globo y concentración más liviana. Se calcula el gradiente de temperatura:

$$\Delta T = T_i - T_f$$

$$\Delta T = 20,34 \text{ °C} - (-10,43 \text{ °C})$$

$$\Delta T = 30,77 \text{ °C}$$

Se calcula la velocidad de enfriamiento a partir del gradiente de temperatura en base a la diferencia de energía térmica y el menor tiempo que presenta la adquisición de datos experimentales.

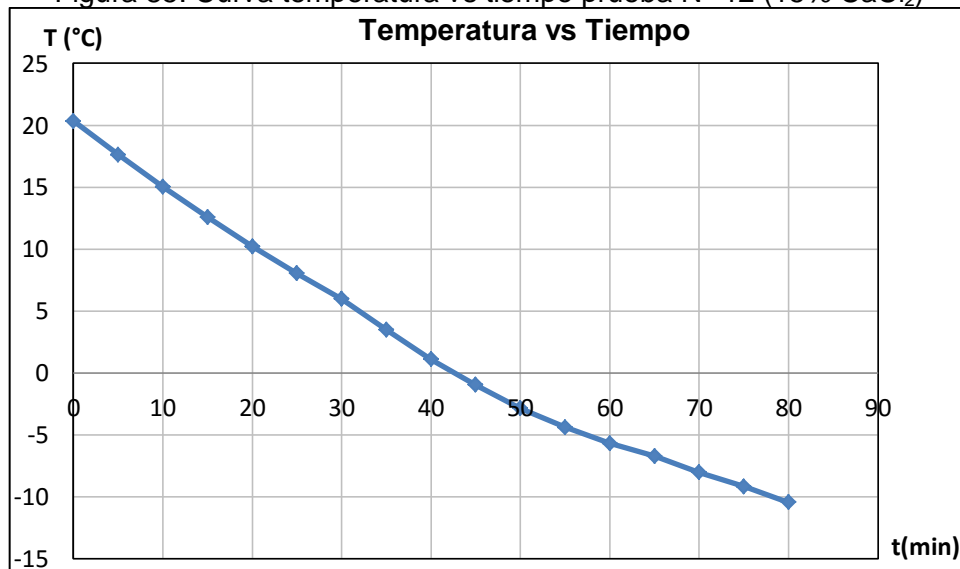
$$V_{\text{enf}} = \frac{\Delta T}{t_{\text{total}}}$$

$$V_{\text{enf}} = \frac{30,77 \text{ °C}}{95 \text{ min}}$$

$$V_{\text{enf}} = 0,385 \text{ °C/min}$$

$$V_{\text{enf}} = 23,078 \text{ °C/h}$$

Figura 85. Curva temperatura vs tiempo prueba N° 12 (15% CaCl₂)



Fuente: Autores

4.4.23 *Resultados de las pruebas para concentración del 15% CaCl₂*. Una vez realizadas las pruebas para las estrangulaciones de la válvula que se mencionaron anteriormente, se procede al análisis de los resultados y de las regiones de las curvas, a continuación se detallan los resultados de las pruebas realizadas los cuales serán resumidos en curvas de comportamiento por región de tipo escalonado continuo para enfriamientos rápidos, sub enfriamientos y enfriamientos lentos.

Tabla 39. Resultados de pruebas al 15% CaCl₂

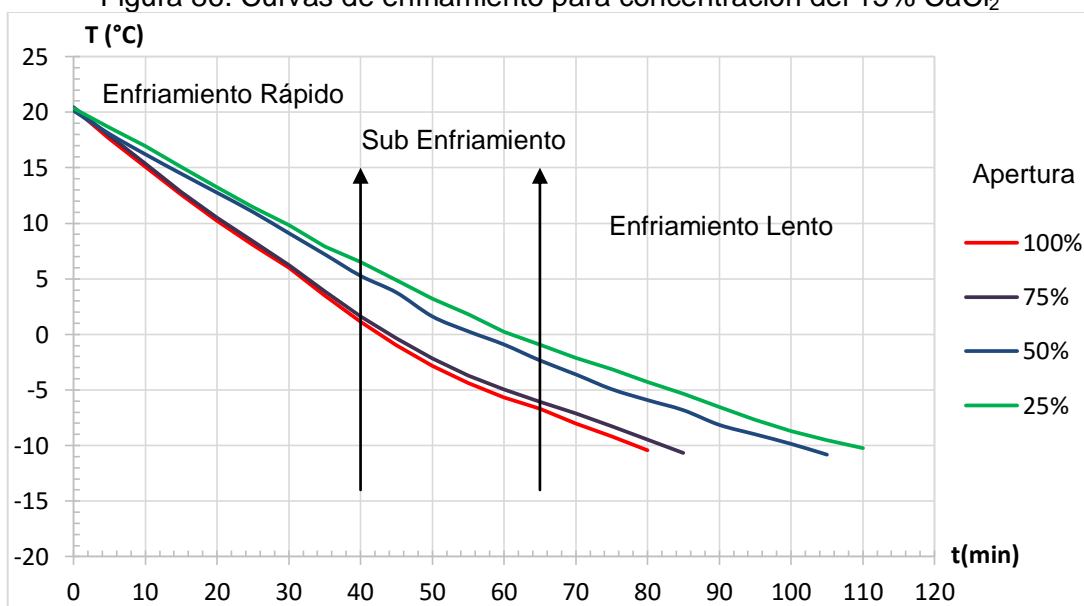
N° Prueba	Apertura	Q [l/min]	ΔT [°C]	V _{enf} [°C/min]	V _{enf} [°C/h]	t _{total} [min]
9	25%	9,73	30,58	0,278	16,680	110
10	50%	14,05	30,95	0,295	17,686	105
11	75%	21,49	31,12	0,366	21,967	85
12	100%	25,49	30,77	0,385	23,078	80

Fuente: Autores

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 38 se puede concluir que la velocidad de enfriamiento para la salmuera depende de la apertura de la válvula por consiguiente del caudal que se suministra al equipo. Se puede notar que a mayor caudal mayor es la velocidad de enfriamiento a su vez que el tiempo que tarda en lograr la temperatura deseada de -10 °C es menor y que se necesita un menor esfuerzo del equipo por tanto una mejor eficiencia del mismo.

4.4.24 *Análisis de las regiones en las curvas de enfriamiento*

Figura 86. Curvas de enfriamiento para concentración del 15% CaCl₂



Fuente: Autores

Tabla 40. Velocidades de enfriamiento por regiones 15% CaCl₂

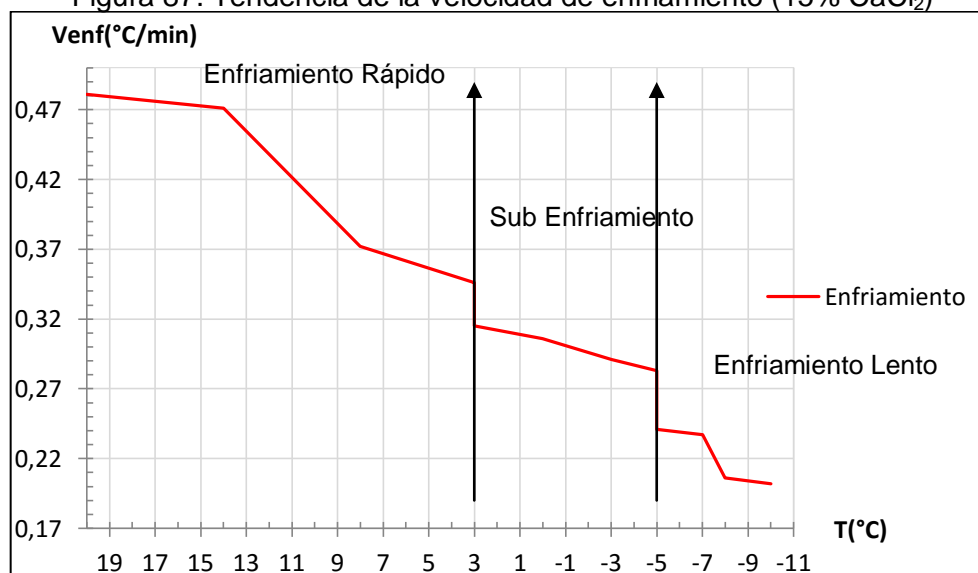
Variación de caudal		Enfriamiento rápido	Sub enfriamiento	Enfriamiento lento
Apertura	Caudal(Lt/min)	Venf [°C/min]	Venf [°C/min]	Venf [°C/min]
25%	9,73	0,346	0,283	0,202
50%	14,05	0,372	0,291	0,206
75%	21,49	0,471	0,306	0,237
100%	25,49	0,481	0,315	0,241
Velocidad promedio		0,417	0,299	0,222

Fuente: Autores.

De la figura anterior podemos notar que para la concentración del 15% de solución concentrada de CaCl₂ el caudal óptimo para disminuir el tiempo y la velocidad de enfriamiento y por tanto así la eficiencia del equipo de bombeo, intercambiador de calor y de la unidad condensadora es del 100% de apertura de la válvula de globo, se logra llegar a la temperatura de -10 °C en aproximadamente 80 minutos con las mayores velocidades de enfriamiento en todas las pruebas.

La tendencia de la velocidad de enfriamiento en esta concentración es la más favorable hay un enfriamiento continuo pero sobre todo la zona de enfriamiento rápido se alarga bastante tiempo hasta temperaturas aproximadas de 3 °C, una permanencia que acelera notablemente la velocidad de enfriamiento.

Figura 87. Tendencia de la velocidad de enfriamiento (15% CaCl₂)

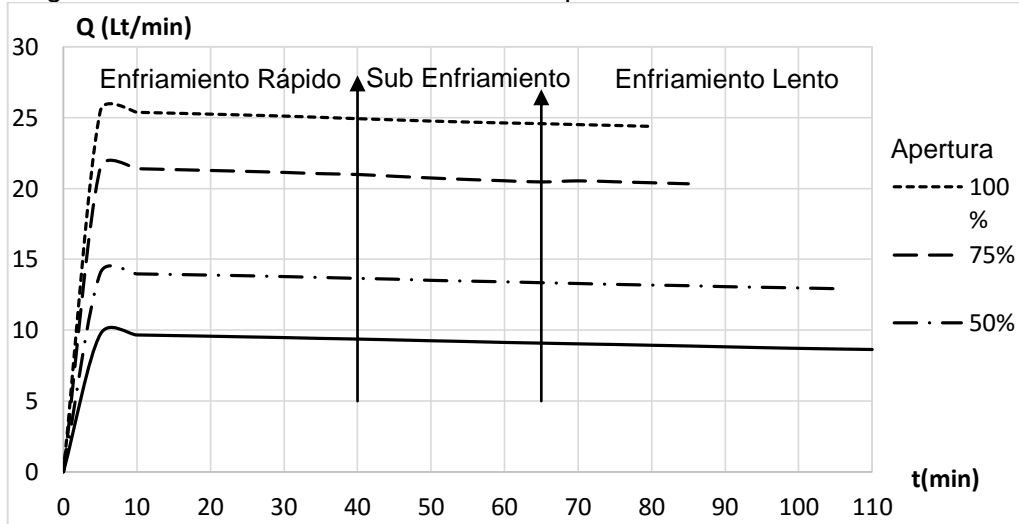


Fuente: Autores

4.4.25 *Análisis de la variación de caudal en las curvas de enfriamiento (15% CaCl₂).* La variación del caudal a esta concentración de cloruro de calcio no son

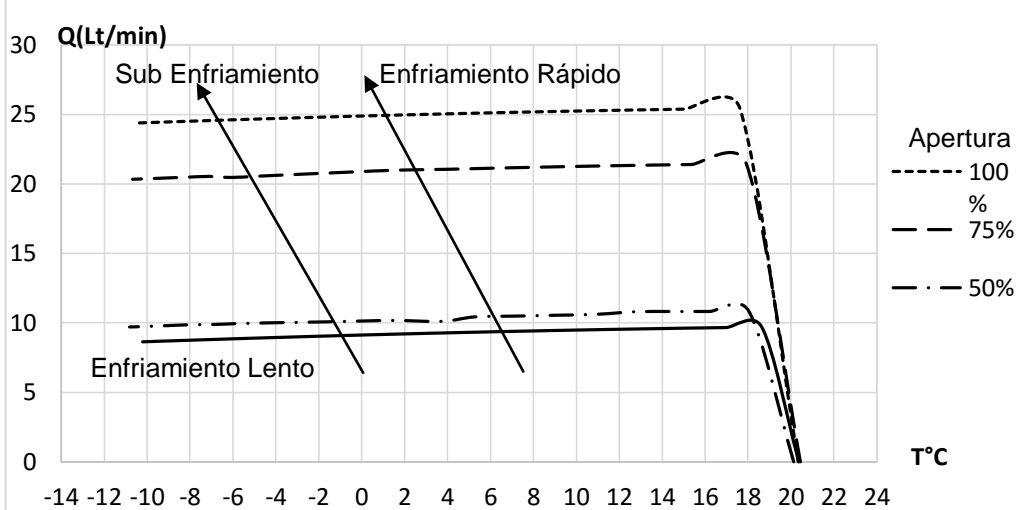
notorios y la eficiencia y velocidad de enfriamiento de la salmuera en circulación son más elevadas, además durante el funcionamiento no se notó un gran congelación del intercambiador de calor, razón por la cual el enfriamiento es continuo proporcional al tiempo con una transferencia de calor mucho más beneficiosa.

Figura 88. Curvas de variación de caudal para concentración del 15% CaCl_2



Fuente: Autores.

Figura 89. Curvas de variación de caudal en función de temperatura (15% CaCl_2)



Fuente: Autores.

4.5 Análisis final del comportamiento por concentración

Las diferentes concentraciones de cloruro de calcio CaCl_2 varían notablemente las condiciones de transferencia de calor por el campo de densidad y calor específico y por consiguiente la velocidad de enfriamiento para cada caso de estudio, los efectos resultados de la experimentación serán analizados a continuación.

4.5.1 *Análisis de la variación de velocidad de enfriamiento por concentración.* En las siguientes gráficas se trazan las curvas de enfriamiento de las tres concentraciones analizadas a una apertura del 100% o caudal máximo, en ellas se notan la variación que tiene la velocidad de enfriamiento de una concentración a otra.

Tabla 41. Tabla de datos experimentales por concentración

15% CaCl ₂		21% CaCl ₂		30% CaCl ₂	
Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]	Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	20,34	0	20,23	0	20,34
5	17,62	5	18,13	5	18,97
10	15,05	10	16,03	10	17,49
15	12,58	15	13,93	15	15,37
20	10,22	20	11,83	20	14,03
25	8,05	25	9,73	25	12,43
30	5,97	30	7,63	30	11,1
35	3,49	35	5,53	35	9,36
40	1,12	40	3,33	40	8,25
45	-0,95	45	1,63	45	7,03
50	-2,86	50	-0,37	50	5,37
55	-4,38	55	-1,77	55	4,03
60	-5,68	60	-3,47	60	2,88
65	-6,7	65	-4,97	65	1,34
70	-8,02	70	-6,27	70	0,44
75	-9,17	75	-7,37	75	-1,15
80	-10,43	80	-8,47	80	-2,35
		85	-9,57	85	-3,47
		90	-10,57	90	-4,92
				95	-5,7
				100	-6,4
				105	-7,8
				110	-8,7
				115	-9,6
				120	-10,3

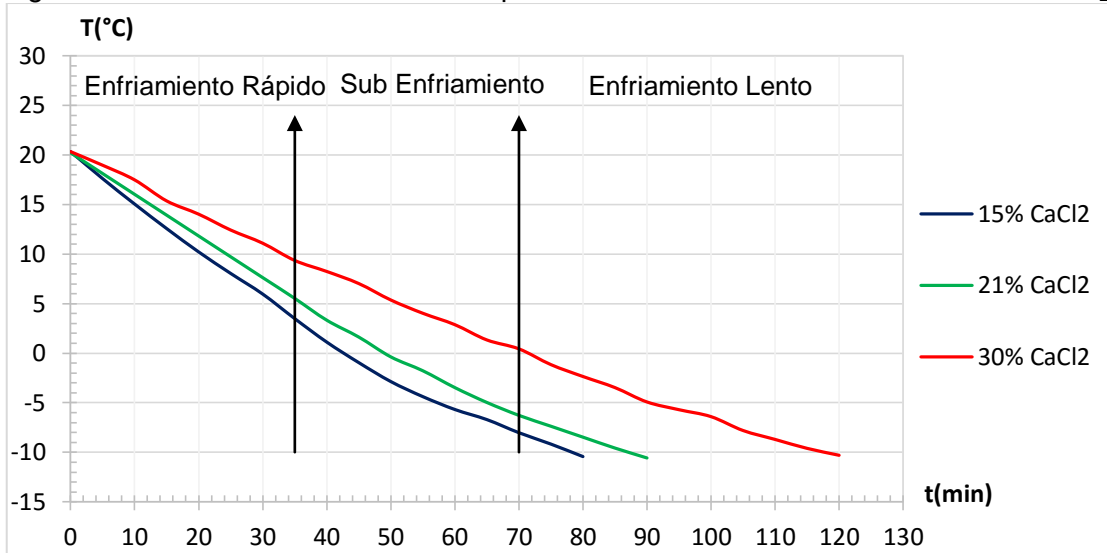
Fuente: Autores

A partir de la definición de calor sensible se calcula el flujo de calor en el intercambiador de calor, para esto se usa la ecuación (1) donde la variación de temperatura ocurre en la diferencia de temperaturas a la entrada y salida del intercambiador. Donde $t_{\text{salida}} - t_{\text{entrada}}$ = variación de temperatura a la salida y entrada.

La ecuación del flujo de calor modificada es la siguiente:

$$Q = \dot{m}c_p(t_{\text{salida}} - t_{\text{entrada}})$$

Figura 90. Curvas de variación de temperatura en función de concentración de CaCl₂



Fuente: Autores.

Tabla 42. Tabla resumen para cálculo de flujo de calor (15% CaCl₂)

15% CaCl ₂ 100% apertura							
Tiempo [min]	T salida [°C]	T entrada [°C]	Caudal [l/min]	Densidad [kg/m ³]	Cp [kJ/kg.K]	q̇ [kJ/min]	q̇ [kw]
0	20,34	16,40	25,44	1131,98	3,3503	380,07	6,33
5	17,62	14,41	25,44	1133,08	3,3443	310,35	5,17
10	15,05	12,32	25,38	1134,10	3,3385	262,31	4,37
15	12,58	10,05	25,32	1135,07	3,3327	242,29	4,04
20	10,22	7,73	25,25	1135,98	3,3271	240,49	4,01
25	8,05	5,61	25,18	1136,81	3,3219	232,99	3,88
30	5,97	3,62	25,11	1137,60	3,3168	224,57	3,74
35	3,49	1,11	25,02	1138,52	3,3106	224,48	3,74
40	1,12	-1,33	24,93	1139,39	3,3045	227,16	3,79
45	-0,95	-3,32	24,84	1140,14	3,2991	219,61	3,66
50	-2,86	-5,11	24,76	1140,83	3,2941	209,36	3,49
55	-4,38	-6,50	24,69	1141,36	3,2900	196,56	3,28
60	-5,68	-7,73	24,63	1141,82	3,2865	186,69	3,11
65	-6,7	-8,62	24,58	1142,18	3,2837	175,15	2,92
70	-8,02	-9,72	24,51	1142,63	3,2801	156,17	2,60
75	-9,17	-10,68	24,45	1143,03	3,2769	138,29	2,30
80	-10,43	-11,71	24,38	1143,46	3,2734	115,91	1,93

Fuente: Autores

Para obtener los datos de calor y específico y densidad en función de la temperatura se utiliza en anexo I: “Diagrama de densidad del cloruro de calcio a diferentes concentraciones” y del anexo J: “Diagrama de calor específico del cloruro de calcio a diferentes concentraciones”. Estas representan las variaciones de las variaciones de las constantes C_p y ρ a diferentes temperaturas.

Tabla 43. Tabla resumen para cálculo de flujo de calor (21% CaCl_2)

21% CaCl_2 100% apertura							
Tiempo [min]	T salida [°C]	T entrada [°C]	Caudal [l/min]	Densidad [kg/m^3]	C_p [kJ/kg.K]	\dot{q} [kJ/min]	\dot{q} [kw]
0	20,23	17,46	22,91	1190,98	3,169	239,52	3,99
5	18,13	15,74	22,91	1192,96	3,144	205,42	3,42
10	16,03	13,83	22,80	1194,83	3,122	187,08	3,12
15	13,93	11,83	22,81	1196,60	3,101	177,75	2,96
20	11,83	9,86	22,69	1198,25	3,082	165,09	2,75
25	9,73	7,88	22,68	1199,79	3,065	154,31	2,57
30	7,63	5,84	22,56	1201,22	3,049	147,92	2,47
35	5,53	3,79	22,44	1202,55	3,036	142,51	2,38
40	3,33	1,63	22,30	1203,81	3,023	137,99	2,30
45	1,63	-0,05	22,20	1204,71	3,015	135,46	2,26
50	-0,37	-2,03	22,08	1205,67	3,007	132,85	2,21
55	-1,77	-3,43	21,73	1206,28	3,002	130,60	2,18
60	-3,47	-5,06	21,62	1206,96	2,997	124,35	2,07
65	-4,97	-6,47	21,53	1207,50	2,994	116,72	1,95
70	-6,27	-7,69	21,44	1207,92	2,991	110,02	1,83
75	-7,37	-8,68	21,37	1208,25	2,990	101,15	1,69
80	-8,47	-9,63	21,30	1208,54	2,989	89,26	1,49
85	-9,57	-10,58	21,23	1208,81	2,989	77,47	1,29
90	-10,57	-11,47	21,16	1209,02	2,989	68,83	1,15

Fuente: Autores

La tabla de resumen de datos para una concentración del 21% de CaCl_2 se grafica en la figura 92 donde se concluye que el calor extraído antes de llegar a 0 °C es mucho mayor que el calor extraído a temperaturas por debajo de 0 °C, lo cual es congruente con la tendencia en las velocidad de enfriamiento que son mayores en la zona de enfriamiento rápido.

Los flujos de calor estimados en el dominio del tiempo por unidad de minuto varían desde los 3,99 kw a los 1,15 kw para temperaturas promedio de -10 °C.

Las figura 92 y figura 93 muestras las tendencias del flujo de calor por unidad de tiempo con las correspondientes variaciones en el calor específico notándose las diferencias en la transferencia de calor en cada composición y apertura.

Tabla 44. Tabla resumen para cálculo de flujo de calor (30% CaCl₂)

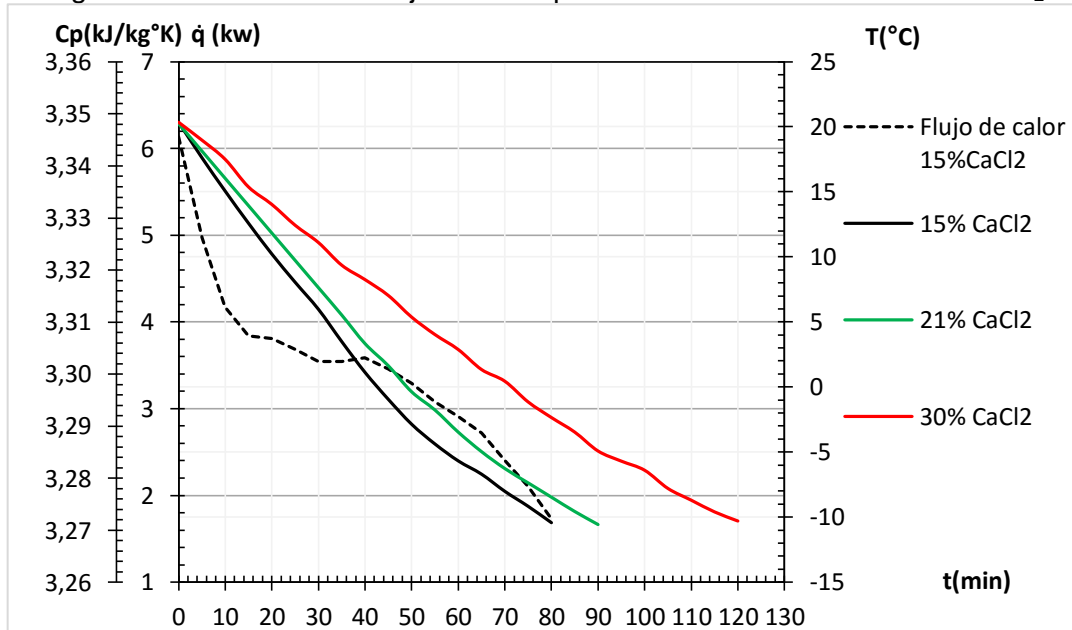
30% CaCl ₂ 100% apertura							
Tiempo [min]	T salida [°C]	T entrada [°C]	Caudal [l/min]	Densidad [kg/m ³]	Cp [kJ/kg.K]	q̇ [kJ/min]	q̇ [kw]
0	20,34	18,13	21,10	1290,18	2,779	167,21	2,79
5	18,97	16,79	21,10	1291,06	2,773	164,67	2,74
10	17,49	15,37	21,04	1292,01	2,766	159,43	2,66
15	15,37	13,31	21,15	1293,36	2,757	155,39	2,59
20	14,03	12,02	21,09	1294,22	2,752	151,01	2,52
25	12,43	10,45	21,02	1295,24	2,746	148,03	2,47
30	11,10	9,17	20,96	1296,10	2,741	143,70	2,40
35	9,36	7,46	20,87	1297,21	2,735	140,71	2,35
40	8,25	6,38	20,45	1297,92	2,732	135,59	2,26
45	7,03	5,21	20,41	1298,70	2,728	131,61	2,19
50	5,37	3,59	20,35	1299,76	2,724	128,25	2,14
55	4,03	2,39	20,30	1300,62	2,720	117,81	1,96
60	2,88	1,40	20,26	1301,36	2,718	106,04	1,77
65	1,34	0,05	20,20	1302,34	2,714	92,11	1,54
70	0,44	-0,76	20,16	1302,92	2,712	85,51	1,43
75	-1,15	-2,28	20,10	1303,94	2,709	80,23	1,34
80	-2,35	-3,39	19,97	1304,70	2,707	73,37	1,22
85	-3,47	-4,46	19,89	1305,42	2,706	69,55	1,16
90	-4,92	-5,88	19,78	1306,35	2,704	67,06	1,12
95	-5,70	-6,62	19,72	1306,85	2,703	64,07	1,07
100	-6,40	-7,29	19,66	1307,30	2,702	61,81	1,03
105	-7,80	-8,64	19,55	1308,19	2,701	58,02	0,97
110	-8,70	-9,51	19,47	1308,77	2,700	55,75	0,93
115	-9,60	-10,39	19,40	1309,34	2,700	54,18	0,90
120	-10,30	-11,08	19,34	1309,79	2,699	53,34	0,89

Fuente: Autores

La tabla de resumen de datos para una concentración del 15% de CaCl₂ se grafica en la figura 91 donde se concluye que el calor extraído antes de llegar a 0 °C es mucho mayor que el calor extraído a temperaturas por debajo de 0 °C, lo cual es congruente con la tendencia en las velocidad de enfriamiento que son mayores en la zona de enfriamiento rápido en comparación a las demás zonas de estudio.

Para la concentración más liviana del 15% de concentración en masa del cloruro de calcio CaCl_2 los resultados de la curva del flujo de calor muestran una gran transferencia de energía térmica.

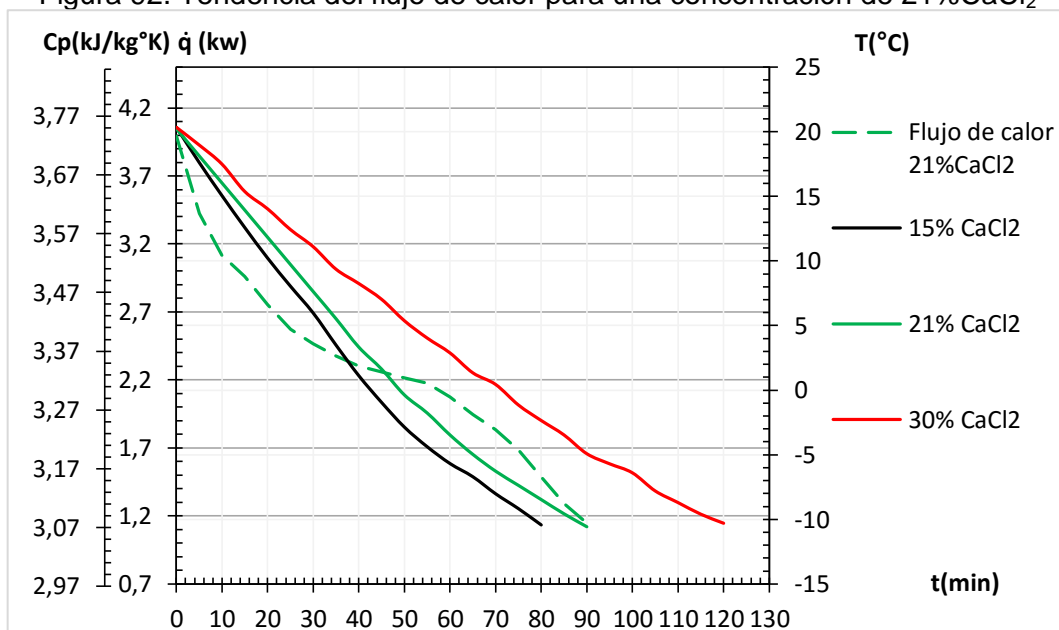
Figura 91. Tendencia del flujo de calor para una concentración de 15% CaCl_2



Fuente: Autores

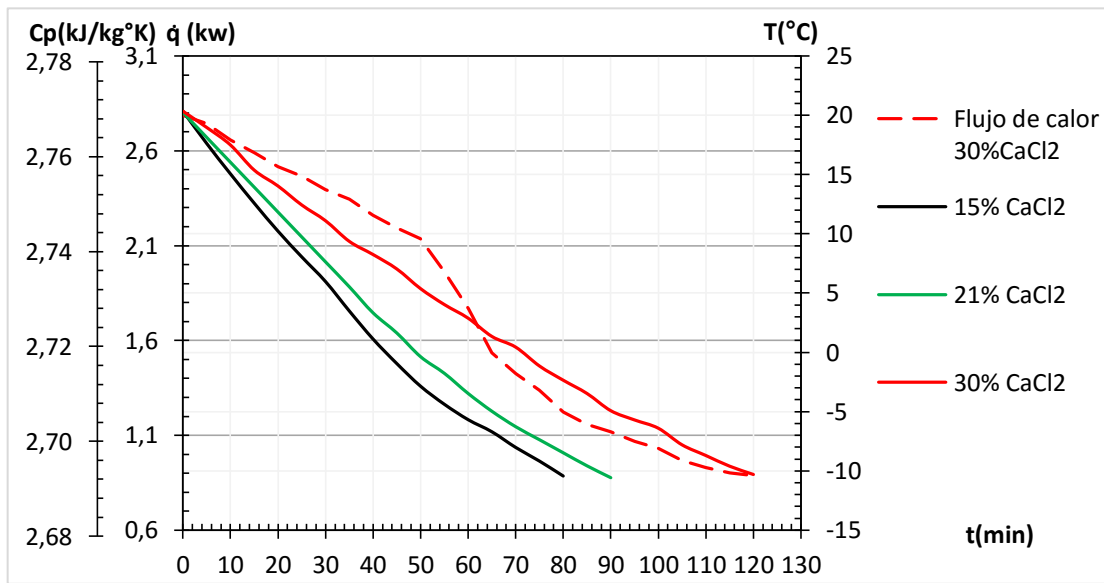
Para la concentración del 21% de concentración en masa del cloruro de calcio CaCl_2 los resultados de la curva del flujo de calor muestran una transferencia de energía térmica que va desde 4,2 kw a 1,2 kw de corriente térmica.

Figura 92. Tendencia del flujo de calor para una concentración de 21% CaCl_2



Fuente: Autores

Figura 93. Tendencia del flujo de calor para una concentración de 30%CaCl₂



Fuente: Autores

La figura 93 muestra las tendencias del flujo de calor por unidad de tiempo con las correspondientes variaciones en el calor específico notándose las diferencias menos pronunciadas en la transferencia de calor en cada composición y apertura lo que significa una transferencia de calor más pobre.

4.6 Guías de laboratorio

Debido a que el chiller es un equipo en el cual se desea realizar prácticas de laboratorio con el fin reforzar el aprendizaje de la materia de refrigeración, es necesaria la elaboración de una guía para práctica de laboratorio. El desarrollo de la guía de laboratorio se presenta en el anexo O "Guía de laboratorio".

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE COSTOS

5.1 Descripción del análisis de costos

En el presente análisis de costos se detalla los gastos realizados a lo largo del proyecto de tesis, estos gastos se dividen en costos directos e indirectos. A continuación se muestran las tablas en las cuales se detallan los costos directos e indirectos.

5.2 Costos directos

Dentro de este análisis de costos se debe tomar en cuenta todos aquellos que intervienen de forma directa en el proyecto tales como materiales, maquinarias y equipos, mano de obra, envíos y transporte.

5.2.1 Costo de materiales y accesorios

Tabla 45. Costo de materiales eléctricos y electrónicos

Elemento	Descripción	Cant.	V. Unit.	V. Total [USD]
Sensor de flujo	P51530-P0,tipo paleta	1	335,80	335,80
Brida tipo " T"	MPV8T007F	1	105,00	105,00
Sensor temperatura	Termistor NTC	1	15,50	15,50
Tarjeta adquisición de datos	NI myDAQ-drivers	1	386,85	386,85
Servomotor	BMS-L530 MG	1	220,00	220,00
Relé estado solido	HW-1-DA4840	1	18,00	18,00
Regulador de voltaje	Integrado	1	8,00	8,00
Disipador para relé	Aluminio roscado	1	15,00	15,00
Resistencia	5 k Ω	4	0,30	1,20
Tarjeta de circuito	PCB	1	15,00	15,00
Regulador	Voltaje 7805	1	2,00	2,00
Fuente	Alimentación 12 v - 5 A	1	19,00	19,00
Total				1141,35

Fuente: Autores

Para materiales y accesorios se tiene un total de 1141,35 USD donde los costos más significativos son los de los sensores, actuador y tarjeta de adquisición.

Tabla 46. Costos de materiales para instalaciones hidráulicas

Elemento	Descripción	Cant.	V. Unit.	V. Total [USD]
Unión universal	RR/PP 3/4 plg	2	2,50	5,00
Codo roscado	PP 3/4 plg x 90°	2	0,75	1,50
Válvula de esférica	3/4 plg	2	7,30	14,60
Tubo de presión	Roscado 3/4 plg x 6 m	1	11,50	11,50
Neplo	RR/PP 3/4 plg x 8	1	0,60	0,60
Neplo	RR/PP 3/4 plg x6	1	0,50	0,50
Soporte para tubería	Acero galvanizado	2	4,00	8,00
Teflón	Blanco	2	0,50	1,00
Sellador	Polimex 25cm ³	1	3,90	3,90
Broca	Para metal 1/8 plg	1	0,80	0,80
Cinta doble Faz	Tantype x 2 m	1	2,50	2,50
Broca	Para metal 5/32 plg	1	1,00	1,00
Abrazadera	Acero inoxidable	8	0,25	2,00
Arandelas	Acero inoxidable	4	0,10	0,40
Tornillos	Cabeza cuad. 5/32 plg	10	0,05	0,50
WD-40	Desoxidante	1	4,25	4,25
Amarras	Plásticas	44	0,10	4,40
Bastidor Servo	Varilla cuadrada	1	25,00	25,00
Papel Aluminio	Lamina Aluminio	1	1,15	1,15
Análisis químico	LABCESTTA	1	30,12	30,12
Total				120,72

Fuente: Autores

Tabla 47. Total de costos de materiales y accesorio.

Denominación	V. Total [USD]
Costo de materiales eléctricos y electrónicos	1141,35
Costos de materiales para instalaciones hidráulicas	120,72
Total	1262,07

Fuente: Autores

El total de los costos de materiales eléctricos, electrónicos y accesorios para la adecuación de las instalaciones hidráulicas para la repotenciación del chiller es de 1262,07 USD.

5.2.2 Costos de maquinarias y equipos utilizados. Estos gastos se generan debido al uso de maquinarias y equipos necesarios para la implementación, adecuación y montaje de los equipos utilizados en el proceso de construcción y automatizado de la adquisición de datos experimentales.

Tabla 48. Costos de maquinarias y equipos

Máquinas/herramientas	Costo/hora	Horas equipo	V. Total [USD]
Tarrajá mecánica	1,00	2	2,00
Entenalla	1,00	2	2,00
Taladro de mano	2,00	1	2,00
Otros equipos	-	-	25,00
Total			31,00

Fuente: Autores

5.2.3 *Costos de mano de obra.* Son aquellos gastos de pagos de mano de obra en instalaciones eléctricas, programación, conexiones hidráulicas, etc.

Tabla 49. Costo mano de obra

Denominación	Descripción	V. Total [USD]
Técnico eléctrico	Conexiones eléctricas	15,00
Plomero	Conexiones hidráulicas	11,00
Soldador	Bastidor servo	10,00
Técnico refrigeración	Cargar refrigerante	45,00
Asesoría	Programación en LabVIEW	100,00
Total		181,00

Fuente: Autores

5.2.4 *Costo de envíos y transporte.* Estos costos son debido al envío de encomiendas y transporte para la adquisición de equipos necesarios para la implementación de la tesis.

Tabla 50. Costo de envíos y transporte

Denominación	Descripción	V. Total
Envío de brida para sensor de flujo	INGUIBRA UIO-RBBA	2,00
Transporte para compra de sensores	INGUIBRA UIO-RBBA	20,00
Transporte técnico de refrigeración	Riobamba	6,00
Total		28,00

Fuente: Autores

5.2.5 *Total de costos directos*

Tabla 51. Total de costos directos.

Denominación	V. Total [USD]
Costo de materiales y accesorios	1262,07
Costos de maquinarias y equipos utilizados	31,00

Costo de mano de obra.	156,00
Costo de envíos y transporte	26,00
Total	1506,07

Fuente: Autores

5.3 Costos indirectos

Dentro de estos costos se toma en cuenta el 5% total de las herramientas utilizadas como costos de herramientas utilizadas, del 10% al 15% de los costos directos como costos de ingeniería además de un valor por imprevistos.

Tabla 52. Costos indirectos.

Denominación	V. Total [USD]
Costo por herramientas utilizadas	16,00
Costos de ingeniería	180,72
Costo por imprevistos	25,00
Total	221,72

Fuente: Autores

5.4 Costos totales

El costo total se determina por la suma de los costos directos más los costos indirectos, que se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 53. Costos totales

Denominación	V. Total
Costo directos	1506,07
Costos indirectos	221,72
Costos totales	1727,79

Fuente: Autores

El total de costos para la culminación del proyecto de tesis es de 1727,79 USD.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se logró la repotenciación del chiller mediante la implementación de un sensor de cauda con paletas, termistor NTC para censar la temperatura, un mecanismo de servomotor para la variación de caudal y una tarjeta de adquisición de datos NI-myDAQ, mediante los cuales y con la utilización del software LabVIEW se recopiló datos con los cuales se elaboró las curvas de enfriamiento de la salmuera, valores que variaron en función de la resistencia de flujo en masa para las concentraciones del 15%, 21% y 30% del cloruro de calcio.

Luego de un análisis termodinámico de eficiencia frigorífica y de la carga del refrigerante en el compresor se procedió a la medición de la corriente de arranque del equipo obteniendo un valor de 10,1 A un valor aceptable revisando los parámetros de diseño, con el cual se tiene un pleno funcionamiento de la unidad condensadora con una capacidad y coeficiente de rendimiento COP de 4,08 y 3,8 respectivamente para un rendimiento de 0,72 del equipo.

En el análisis para la extracción de calor de un volumen de 218 l de solución compuesta a base de cloruro de calcio CaCl_2 en concentraciones experimentales del 15%, 21% y 30% de composición en masa determina que la mayor dificultad es el aumento de resistencia en flujo másico con variaciones estimadas en pérdidas de presión que provocan cambios en los puntos de operación del equipo de bombeo.

Las tendencias de las velocidades de enfriamiento indicaron para una concentración del 15% de CaCl_2 un enfriamiento rápido continuo hasta llegar a temperaturas aproximadas de $-5\text{ }^\circ\text{C}$, mientras que para una concentración del 21% de CaCl_2 la tendencia es escalonada pronunciándose en cada zona de enfriamiento. Para la concentración más pesada en masa de concentración la tendencia es de enfriamiento continuo lento poca escalonada empobreciendo la transferencia de energía calorífica principalmente por la demasía en tiempo de proceso provocando un sobre esfuerzo del equipo de bombeo con la motobomba tipo jet y por el congelamiento de las placas del intercambiador de calor que reduce el área de transferencia de calor.

Durante la experimentación de la concentración molar de 15% de CaCl_2 se enfrenta un fenómeno conocido como sobrefusión lo cual indica que con el aporte de energía cinemática a la salmuera se impide la formación de núcleos cristalinos que inducen a la congelación llegando a temperaturas inferiores a los $10\text{ }^\circ\text{C}$ sin ningún problema esto favorece al sistema de bombeo por una reducción de la viscosidad y desde un punto de vista termodinámico la extracción de calor mejora enormemente.

Para la concentración del 30% de CaCl_2 , el caudal óptimo para disminuir el tiempo y la velocidad de enfriamiento es de 100% de apertura de la válvula, logrando llegar a la temperatura de $-10\text{ }^\circ\text{C}$ en aproximadamente 120 minutos. Además se aprecia que al estrangular la válvula y disminuir el caudal al equipo en un 25% la bomba baja su eficiencia y esto se puede notar en el tiempo que tarda en llegar a los $-10\text{ }^\circ\text{C}$ aumentando este unos 40 minutos más, esto se debe al cambio de densidad que experimenta el CaCl_2 al cambiar del 21% al 30% de concentración.

Al bajar la concentración del CaCl_2 a 15% su densidad disminuye significativamente siendo más fácil de transportar por la bomba de recirculación, esto influye en el tiempo para llegar a los $-10\text{ }^\circ\text{C}$ que disminuye hasta los 80 minutos a una velocidad de enfriamiento promedio de $0,385\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ y un caudal de $25,49\text{ l}/\text{min}$.

6.2 Recomendaciones

Realizar una revisión y mantenimiento de los elementos de adquisición de datos de manera periódica, aplicando un mantenimiento preventivo para evitar futuros daños mayores que comprometan la integridad de todo el equipo.

Tomar en cuenta la temperatura de ambiente en el laboratorio ya que este influye de manera directa en la transferencia de calor del chiller, debido a que se encuentra en un recinto y su temperatura es alta y afecta de manera directa en la unidad condensadora. Verificar la corriente de arranque de la unidad condensadora para verificar que se encuentre en un rango normal, tomando en cuenta que el valor de placa es de $13,2\text{ A}$ y si fuera necesario recargar el refrigerante R404A. Además se debe verificar la carga de refrigerante a través del visor de líquido.

Leer los manuales de operación y de mantenimiento, con el objetivo de realizar los pasos adecuados para el correcto funcionamiento del equipo y para dar el mantenimiento de los diferentes componentes del chiller a un adecuado tiempo.

No utilizar concentraciones del cloruro de calcio mayores al 21%, debido a que al elevar su concentración cambia su densidad, su calor específico y gravedad específica forzando excesivamente al equipo e incluso llegando al recalentamiento de la bomba de recirculación.

Revisar las instalaciones eléctricas del laboratorio asegurando que llegue a los equipos el flujo de corriente y tensión adecuadas, de esta manera se lograra alargar la vida útil del equipo.

Cambiar la bomba de recirculación y el intercambiador de placas para poder realizar pruebas en el equipo con concentraciones altas de cloruro de calcio sin que esto afecte de manera drástica al equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- ASHRAE. 2010.** *ASHRAE HANDBOOK REFRIGERATION*. Atlanta, GA 30329 : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010. ISBN 978-1-933742-82-3.
- ASHRAE. 1990.** *Refrigeración. Sistemas y aplicaciones*. 1990.
- CENGEL, Yunus. 1998.** *Transferencia de calor*. Madrid : McGraw-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A DE C.V., 1998. ISBN-13: 978-970-10-6173-2 / ISBN-10: 970-10-6173-X.
- CHAPMAN, Alan J. 1984.** *Transferencia de calor*. Madrid : Bellisco, 1984.
- COPELAND. 2010.** *Manual de refrigeración*. [aut. libro] Copeland. 2010.
- DANFOSS. 2004.** *Automatización de instalaciones de refrigeración comerciales*. Mexico : Danfoss, 2004.
- DANFOSS. 2013.** *Lista de precios 2013*. Colombia : Danfoss, 2013.
- HOLMAN, J P. 1998.** *Transferencia de calor*. Madrid : Mc Graw Hill, 1998. ISBN 007-844785-2.
- INCROPERA, Frank. 1999.** *Fundamentos de transferencia de calor*. [aut. libro] Frank Incropera. Mexico : Pearson Prentice Hall, 1999.
- Miller, D.K. 1974.** *Refrigeration problems of a VCM carrying tanker*. Whashington, D.C. : ASHRAE Journal 11, 1974. ISBN 978-1-933742-82-3.
- Miller, D.K. 1979.** *Sizing dual suction risers in liquid overfeed refrigeration systems*. Washington, D.C. : Proceedings of the IIR Conference, Washington, D.C., 1979.
- OCCIDENTAL. 2003.** *CHILE, OCCIDENTAL CHEMICAL CHILE LIMITADA Manual cloruro de calcio CaCl₂*. Santiago de Chile : OXY, 2003. ISO 14001.
- OCCIDENTAL. 2006.** *Manual de cloruro de calcio CaCl₂*. [En línea] 23 de 01 de 2006. [Citado el: 01 de 06 de 2015.]
- PHILLIPS, Andy. 2010.** *Brine Flids Modifications*. [En línea] 17 de 11 de 2010. [Citado el: 12 de 05 de 2015.] www.geo.com.
- TECUMSEH. 2002.** *Aplicaciones de refrigeración*. Inglaterra : Tecumseh, 2002.
- THOMPSON, R.B. 1970.** *Control of evaporators in liquid overfeed systems*. s.l. : ASHRAE Symposium Bulletin KC-70-3, 1970.
- Universidad de Valladolid. 2005.** uva. [En línea] 2005. [Citado el: 01 de Noviembre de 2015.] www5.uva.es.
- VALENZUELA, Ramiro. 2010.** *Apuntes de refrigeración*. [aut. libro] Ramiro Valenzuela. *Apuntes de transferencia de calor*. Riobamba : s.n, 2010.
- VILLANUEVA, Rafaél. 1995.** *Tipos de refrigerantes*. 1995 : Dupond, 1995.

