

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR, PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**“REPOTENCIACIÓN, REDISEÑO TÉRMICO, ADQUISICIÓN DE DATOS,
Y PUESTA A PUNTO PARA EL EQUIPO “BOMBA DE CALOR MECÁNICA”
DEL LABORATORIO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA”**

**AUTORES: DUCHICELA ALTAMIRANO, DIEGO FERNANDO
SUQUILANDA RUIZ, GONZALO JAVIER**

TUTOR ACADÉMICO: ING. VILLAVICENCIO POVEDA, ÁNGELO HOMERO

2023





CONTENIDO

- Justificación e Importancia
- Objetivos
- Levantamiento técnico
- Repotenciación
- Adquisición de datos
- Interfaz de usuario (HMI)
- Puesta a punto
- Rediseño Térmico
- Pruebas de funcionamiento
- Resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Referencias Bibliográficas

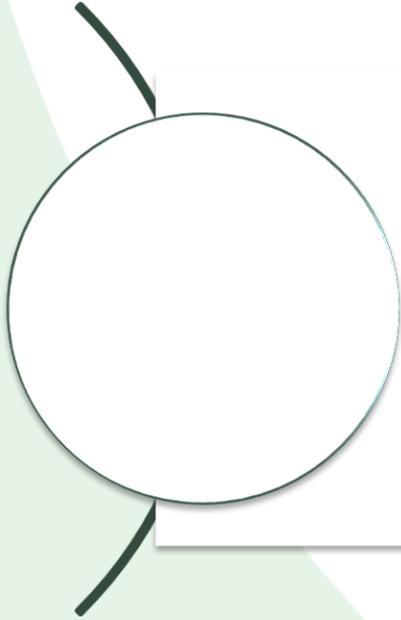


JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA





OBJETIVO GENERAL



Desarrollar la repotenciación, rediseño térmico, y el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para la Bomba de Calor Mecánica, del Laboratorio de Conversión de la Energía.



OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1. *Evaluar técnicamente el estado inicial de los componentes e instrumentos de medición de la Bomba de Calor Mecánica.*
- 2. *Repotenciar los componentes que lo requieran, para lograr la completa recuperación y correcto funcionamiento del equipo.*
- 3. *Rediseñar térmicamente el equipo instalando un intercambiador de calor que permita variar el coeficiente de operación COP.*
- 4. *Diseñar un sistema de adquisición de datos que permita obtener de forma rápida las medidas relacionadas con las variables de interés del equipo.*
- 5. *Implementar una interfaz HMI, intuitiva y de fácil uso para alumnos y profesores.*



Componentes de la Bomba de Calor

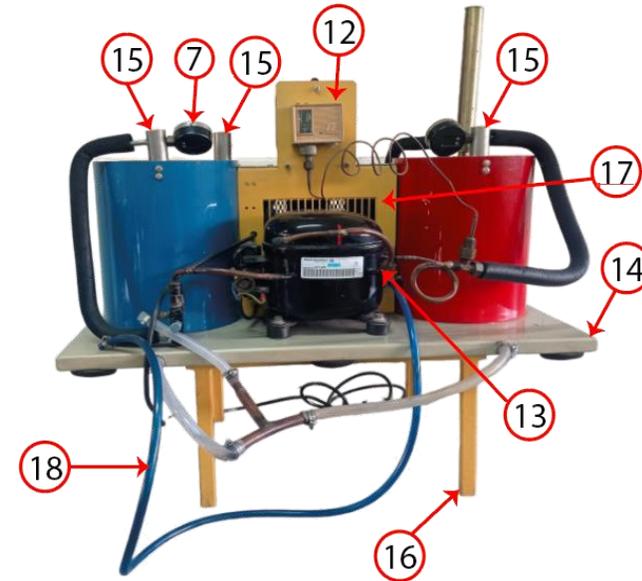
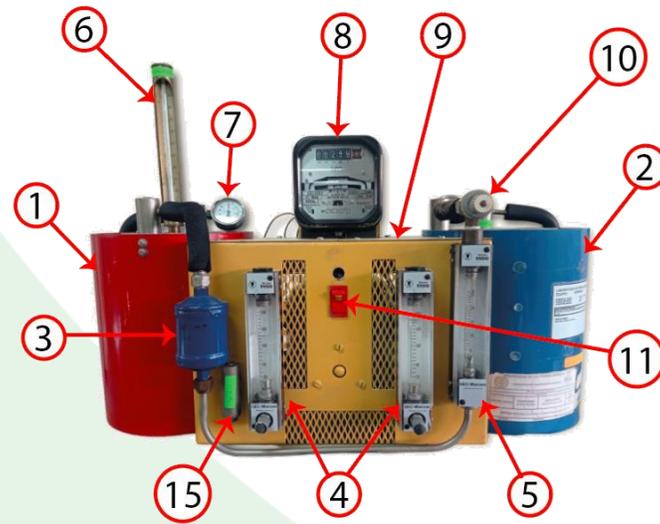


Figura 1. Partes principales del equipo



Estado inicial de componentes



Figura 2. Estado inicial de componentes



Estado inicial de la parte estructural

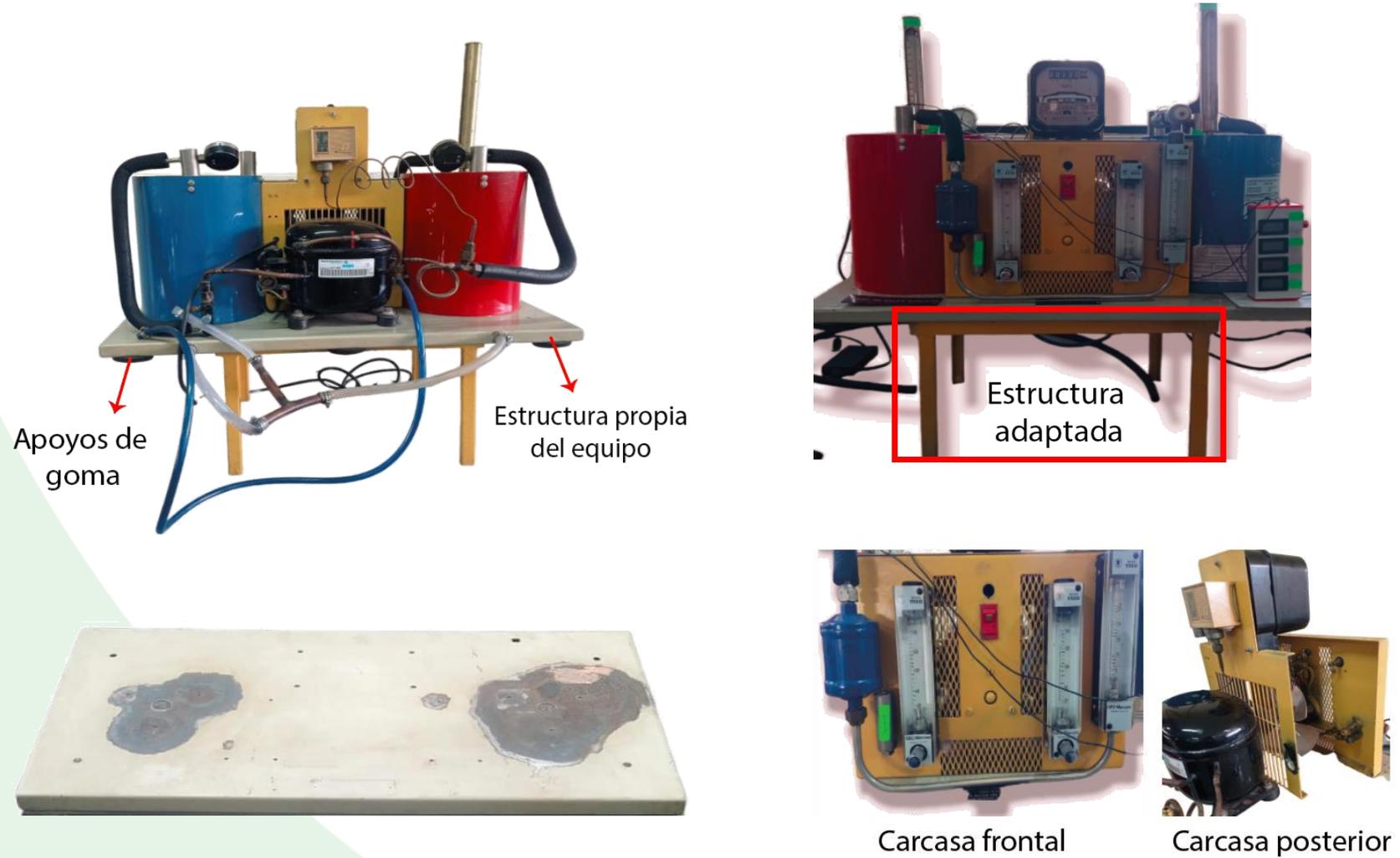


Figura 3. Condiciones iniciales de la parte estructural

Estado inicial de instrumentación

Tabla 1. Variables e instrumentos de medición

Variable	Instrumento de medición
Flujo	Rotámetro
Temperatura	Termómetro
Presión	Manómetro
Consumo eléctrico	Vatíhorímetro

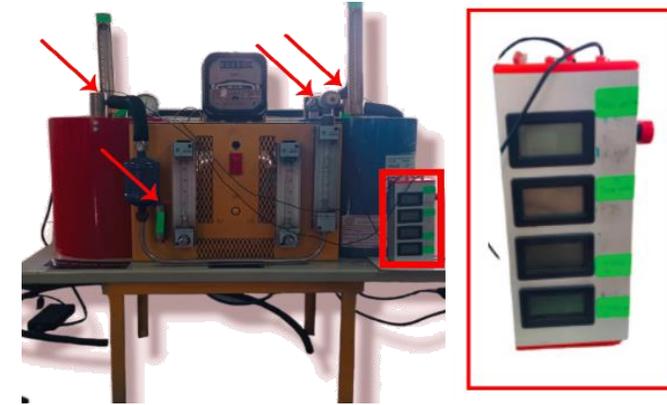


Figura 4. Termómetro digital de cuatro sondas



Figura 5. Rotámetros de agua y refrigerante



Figura 6. Manómetros de evaporador y condensador



Estado inicial de instrumentación



Figura 7. Rotámetro y vatíhorímetro

Estado inicial de componentes eléctricos

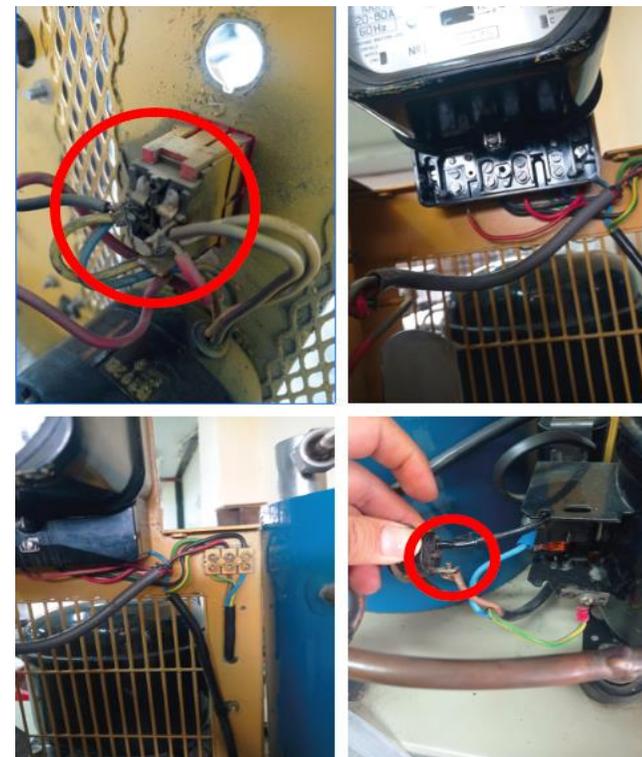


Figura 8. Sistema eléctrico del equipo



Recuperación de componentes



Figura 9. Limpieza superficial de todos los componentes



Incorporación de accesorios y cambio de componentes



Figura 10. Válvula de tres vías



Figura 11. Intercambiador de calor



Figura 12. Válvula antirretorno

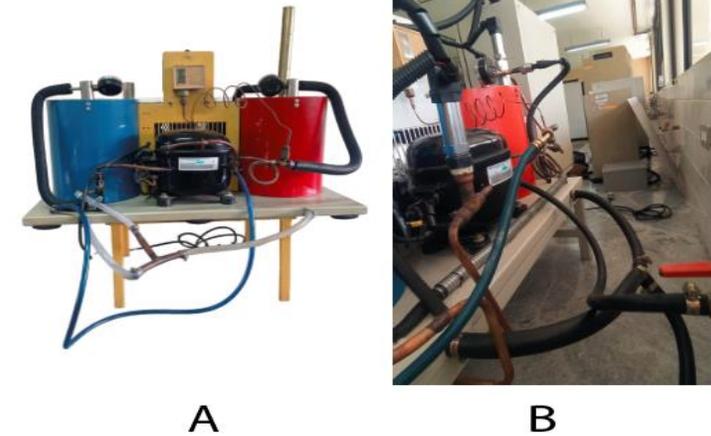
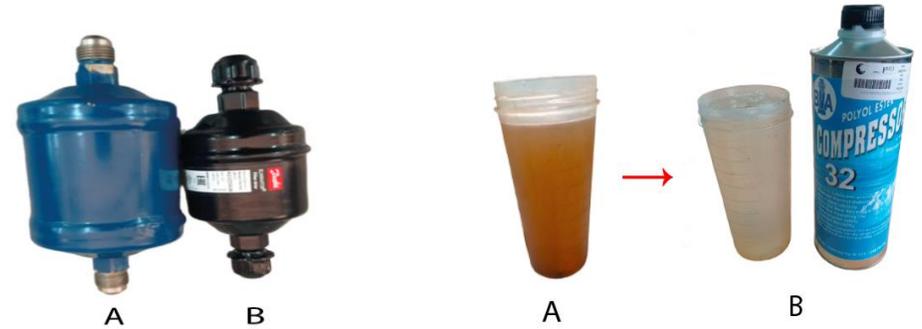


Figura 13. Sustitución de componentes desgastados

Conexiones utilizadas en el sistema de refrigeración



Figura 14. Neplos, roscas cónicas y conexión tipo T



Figura 15. Diseño de cápsulas para sensor

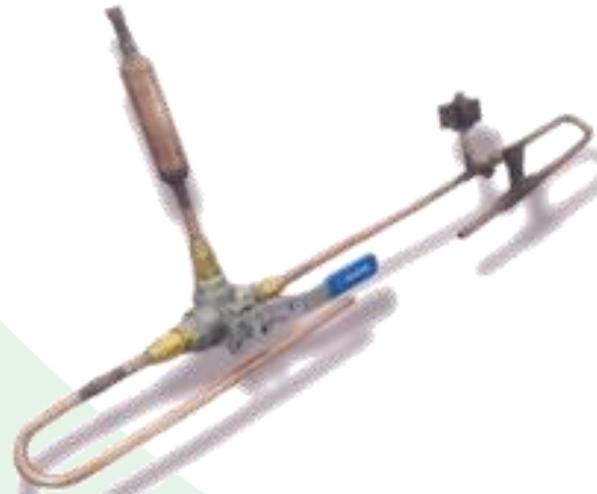


Figura 16. Tuberías y accesorios adicionadas al sistema de refrigeración

Diseño de estructura soporte

Tabla 2. Peso de cada componente del equipo

Denominación	Peso (kg)
Compresor	30
Tanque de condensador vacío	3
Tanque de evaporador vacío	3
Contenido de agua del taque de condensador	6.11
Contenido de agua del taque de evaporador	6.11
Estructura propia	5
Carcasas	4
Accesorios (válvulas, tuberías, mangueras, etc.)	5
Instrumentación y material eléctrico	10
Total	72.22

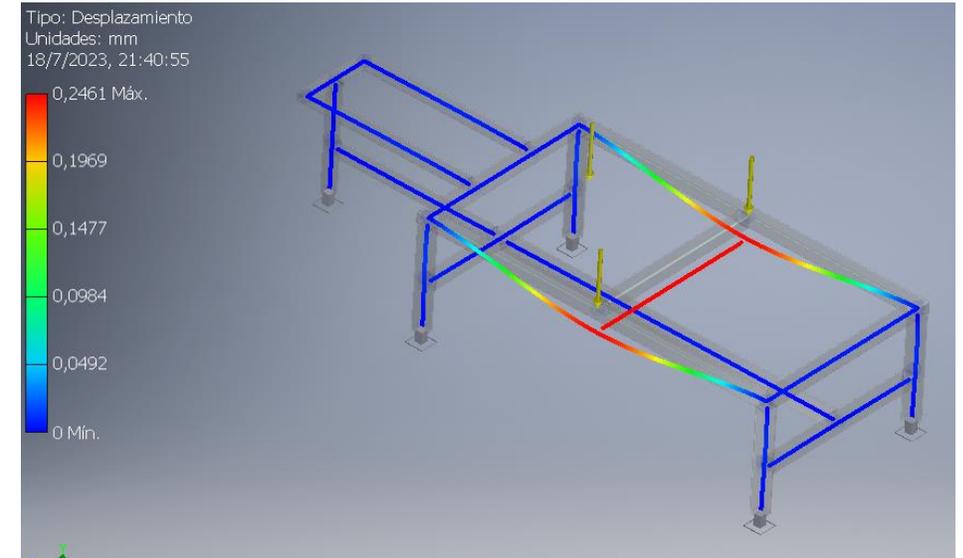


Figura 17. Análisis estático de la estructura metálica



Recuperación Mecánica

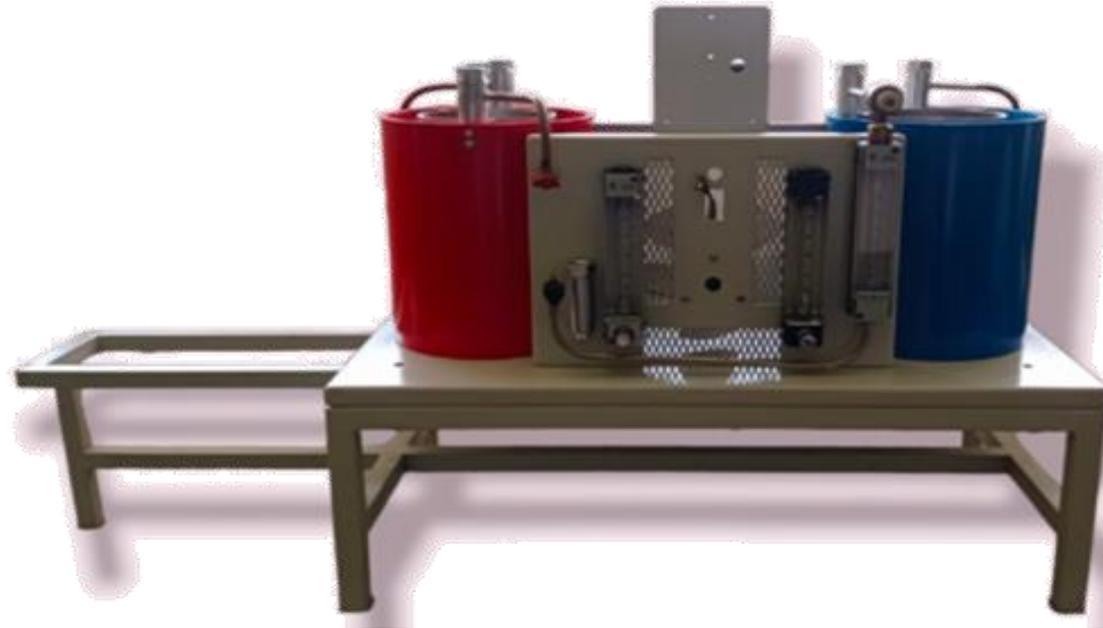


Figura 18. Ensamble de las partes mecánicas del equipo



Identificación de variables y rangos de funcionamiento

Tabla 3. Variable a medir

Variables	Cantidad
Temperatura	9
Presión	2
Consumo eléctrico	1
Total	12

Tabla 4. Rangos de funcionamiento de las variables de temperatura y presión

Fluido	Variable	Simb	min	max	Unidad
Agua	Salida del evaporador	Te	-50	50	[°C]
	Salida del condensador	Tc	0	100	[°C]
	Suministro de red	To	0	50	[°C]
R134a	Entrada del evaporador	T1	-100	50	[°C]
	Salida del evaporador	T2	-50	50	[°C]
	Entrada del condensador	T3	0	150	[°C]
	Salida del condensador	T4	0	100	[°C]
	Salida del intercambiador (vapor)	T2'	-50	50	[°C]
	Salida del intercambiador (líquido)	T4'	0	100	[°C]
	Presión absoluta en el evaporador	Pe	0	5	[bar]
	Presión absoluta en el condensador	Pc	0	15	[bar]

Tabla 5. Rangos de temperatura a soportar por los sensores de presión

Fluido	Variable	min	max	Unidad
R134a	Sensor de presión del evaporador	-50	50	[°C]
	Sensor de presión del condensador	0	150	[°C]



ECUADOR

Selección del Controlador

Tabla 6. Matriz de decisión del controlador

Parámetro	Ponderación	Arduino Mega ADK Rev3	DAQ NI USB-6009	PLC modular DVP20SX2
Num entradas analógicas	10	10	10	10
Voltaje de alimentación	10	10	9	9
Disponibilidad en el mercado	10	8	9	7
Programación	10	8	9	9
Costo del dispositivo	10	10	5	9
Facilidad de instalación	10	6	8	10
Funcionalidad	10	7	7	10
Puntuación total	70	59	57	64



Selección de sensores de temperatura y presión

Tabla 7. Matriz de decisión de sensores de temperatura

Parámetro	Ponderación	Termocupla tipo K	HDT-500	XTP25N-030-N40140F
Voltaje de alimentación de 24 V	10	10	10	10
Resolución	10	-	9	10
Transmisor (4 a 20 mA o 0 a 10V)	10	-	10	10
Longitud de sonda	10	8	10	10
Facilidad de instalación	10	8	10	10
Costo del dispositivo	10	10	9	6
Puntuación total	60	36	58	56

Tabla 8. Matriz de decisión de sensores de presión

Parámetro	Ponderación	PCM300	HDP-500	PT12 con display
Voltaje de alimentación de 24 V	10	10	10	10
Resolución	10	10	10	10
Transmisor (4 a 20 mA o 0 a 10V)	10	10	10	8
Rango de temperatura de op.	10	5	10	10
Facilidad de instalación	10	10	10	10
Costo del equipo	10	8	7	5
Puntuación total	60	53	57	53



Selección de sensor de consumo eléctrico y HMI

Tabla 9. Matriz de decisión de sensor de consumo eléctrico

Parámetro	Ponderación	TRXNELE DDS662	KETOTEK Smart energy monitor	HD-T series current transmitter
Voltaje de alimentación de 24 V	10	-	-	10
Salida (4 a 20 mA o 0 a 10 V)	10	-	-	10
Facilidad de instalación	10	10	10	10
Costo del sensor	10	10	9	5
Puntuación total	40	20	19	35

Tabla 10. Matriz de decisión de HMI

Parámetro	Ponderación	HMI KINCO GL070E	HMI DOP- 107BV	HMI DELTA DOP-103W
Voltaje de alimentación de 24 V	10	10	10	10
Protocolo de comunicación Ethernet	10	10	10	10
Tamaño de Display 4-7"	10	10	10	8
Costo del HMI	10	10	9	7
Puntuación total	40	40	39	35



Diseño frontal del tablero de control

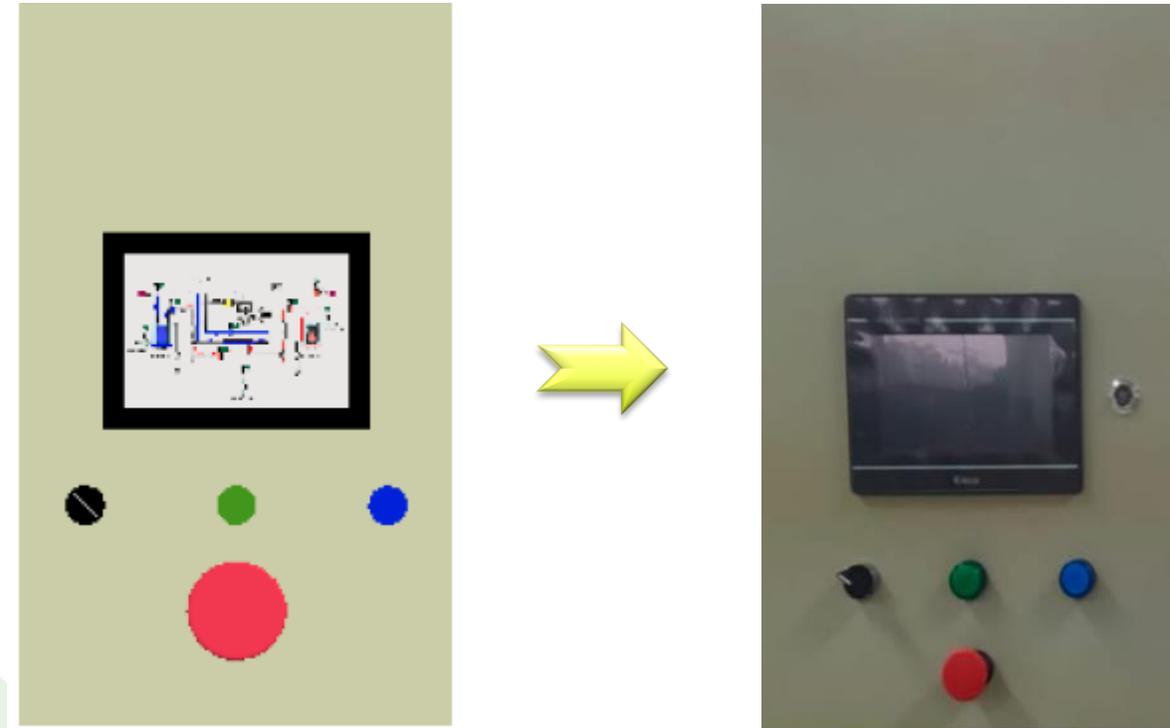


Figura 19. Diseño de la parte frontal del tablero eléctrico



Diseño del sistema eléctrico

Tabla 11. Datos técnicos del compresor

Característica	Especificación
Marca	Kelvinator
Voltaje	110 AC
Corriente nominal	5A
Frecuencias	60 z
Fases	1 ~

Tabla 12. Datos técnicos del ventilador

Característica	Especificación
Marca	NI
Voltaje	110 AC
Corriente nominal	1A
Frecuencias	60 z
Fases	1 ~

Tabla 13. Datos técnicos del PLC modular DVP20SX2

Característica	Especificación
Marca	Delta
Voltaje de entrada	24 VDC
Consumo eléctrico	0.5 A



Diseño del sistema eléctrico

Tabla 14. Datos eléctricos de sensor HDT-500

Característica	Especificación
Marca	HDT
Voltaje de entrada	24 VDC
Consumo eléctrico	0.35 A

Tabla 15. Datos eléctricos de sensor HDP-500

Característica	Especificación
Marca	HDP
Voltaje de entrada	24 VDC
Consumo eléctrico	0.35 A

Tabla 16. Datos eléctricos de sensor HD-T

Característica	Especificación
Marca	HD-T
Voltaje de entrada	24 VDC
Consumo eléctrico	0.025 A

Tabla 17. Datos eléctricos de HMI KINCO GL070E

Característica	Especificación
Marca	KINCO
Voltaje de entrada	24 VDC
Consumo eléctrico	0.5 – 0.9 A



ECUADOR

Dimensionamiento de la fuente de alimentación

Tabla 18. Dimensionamiento de la fuente de alimentación

Componente	Cant	Corriente nominal	Total
PLC modular DVP20SX2	3	0.4 A	1.2 A
Sensores HDT-500	9	0.2 A	1.8 A
Sensores HDP-500	2	0.2 A	0.4 A
HD-T series current transmitter	1	0.025 A	0.025 A
HMI KINCO GL070E	1	0.5 A	0.5 A
TOTAL			3.925 A

Tabla 19. Datos técnicos de la fuente de alimentación

Característica	Descripción
Voltaje de alimentación	110 VAC
Corriente de salida	5 A
Voltaje de salida	24 VDC
Potencia de salida	120 W
Tipo de entrada	1 ~



Dimensionamiento del interruptor termomagnético

Tabla 20. Dimensionamiento del interruptor termomagnético

Componentes	Cantidad	Corriente nominal	Total
Motor de compresor	1	5 A	5 A
Ventilador	1	1 A	1 A
Pilotos	2	5 A	10 A
Total			16 A

Conductores para el sistema eléctrico

Para corriente alterna 110 VAC se empleará un conductor AWG #16 que soportan una corriente máxima de 5 A y cuenta con aislamiento THW, mientras que para la corriente directa se empleará un conductor AWG #18 precisamente para la parte eléctrica de todos los sensores.

Implementación del sistema de adquisición de datos



Figura 20. Distribución de componentes en el tablero eléctrico



Asignación de sensores en borneras

Tabla 21. Ubicación de borneras para sensores

Módulos del PLC	Conexión física del PLC	Borneras asignada	Nomenclatura
Módulo principal	V0I0	Borneras Inferior 1	T1
	V1I1	Borneras Inferior 2	T2
	V2I2	Borneras Inferior 3	Te
	V3I3	Borneras Inferior 4	T3
Módulo de expansión 1	V4I4	Borneras Inferior 5	T4
	V5I5	Borneras Inferior 6	Tc
	V6I6	Borneras Inferior 7	T2'
	V7I7	Borneras Inferior 8	T4'
	V8I8	Borneras Superior 1	To
Módulo de expansión 2	V9I9	Borneras Superior 2	W
	V10I10	Borneras Superior 3	Pc
	V11I11	Borneras Superior 4	Pe

Conexiones eléctricas del PLC y sensores

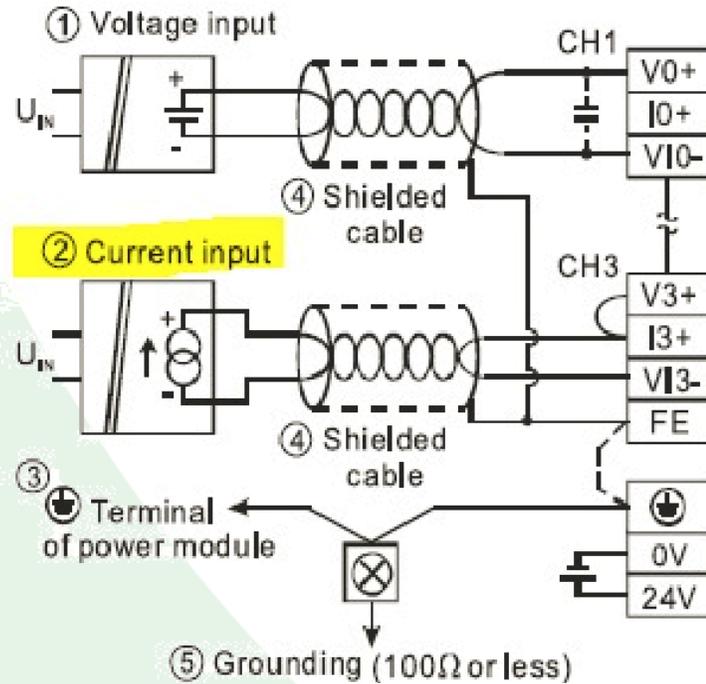


Figura 21. Conexión del PLC para recibir señales de corriente

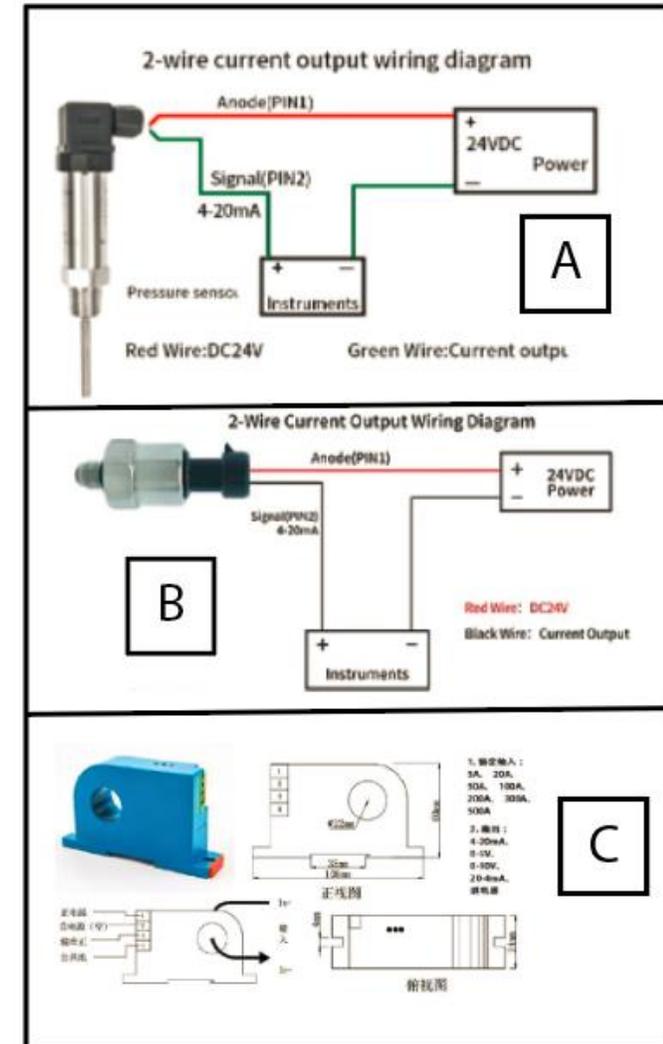


Figura 22. Conexión eléctrica de sensores de corriente



Escalamiento de sensores

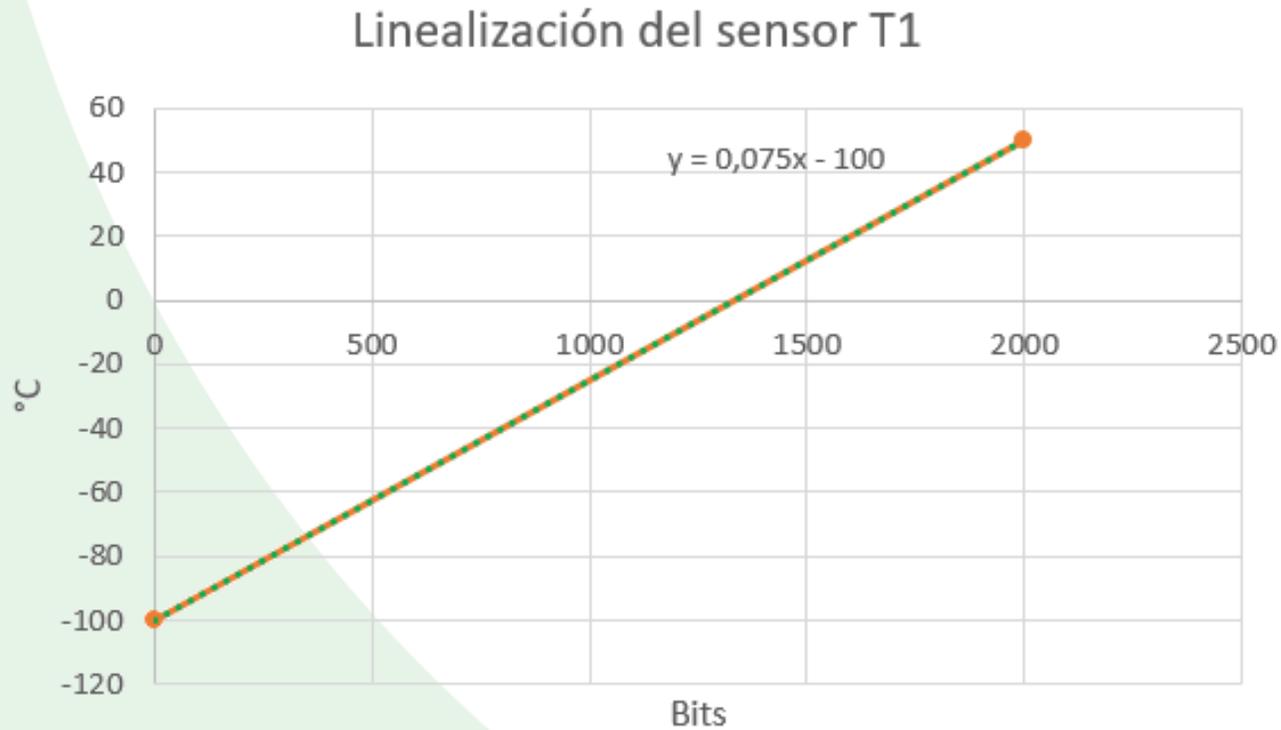


Figura 23. Linealización de sensor de temperatura T1

$$\frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1} = \frac{X - X_1}{X_2 - X_1}$$
$$\frac{Y - (-100)}{50 - (-100)} = \frac{X - 0}{2000 - 0}$$
$$\frac{Y + 100}{50 + 100} = \frac{X}{2000}$$
$$Y = 0.075X - 100$$



Escalamiento de sensores

Tabla 22. Linealización de sensores

Módulos de PLC	Rango de medición	Variable	Ecuación de linealización
Modulo principal	-100 a 50 °C	T1	$y = 0.075x - 50$
	-50 a 50 °C	T2	$y = 0.05x - 50$
	-50 a 50 °C	Te	$y = 0.05x - 50$
	0 a 150 °C	T3	$y = 0.075x$
Módulo de expansión 1	0 a 100 °C	T4	$y = 0.25x$
	0 a 100 °C	Tc	$y = 0.25x$
	-50 a 50 °C	T6	$y = 0.05x - 50$
	0 a 150 °C	T5	$y = 0.075x$
	0 a 50 °C	To	$y = 0.025x$
	0 a 100 A	W	$y = 0.025x$
Módulo de expansión 2	0 a 5 Bar	Pc	$y = 0.0013x$
	0 a 15 Bar	Pe	$y = 0.0038x$



Programación del PLC

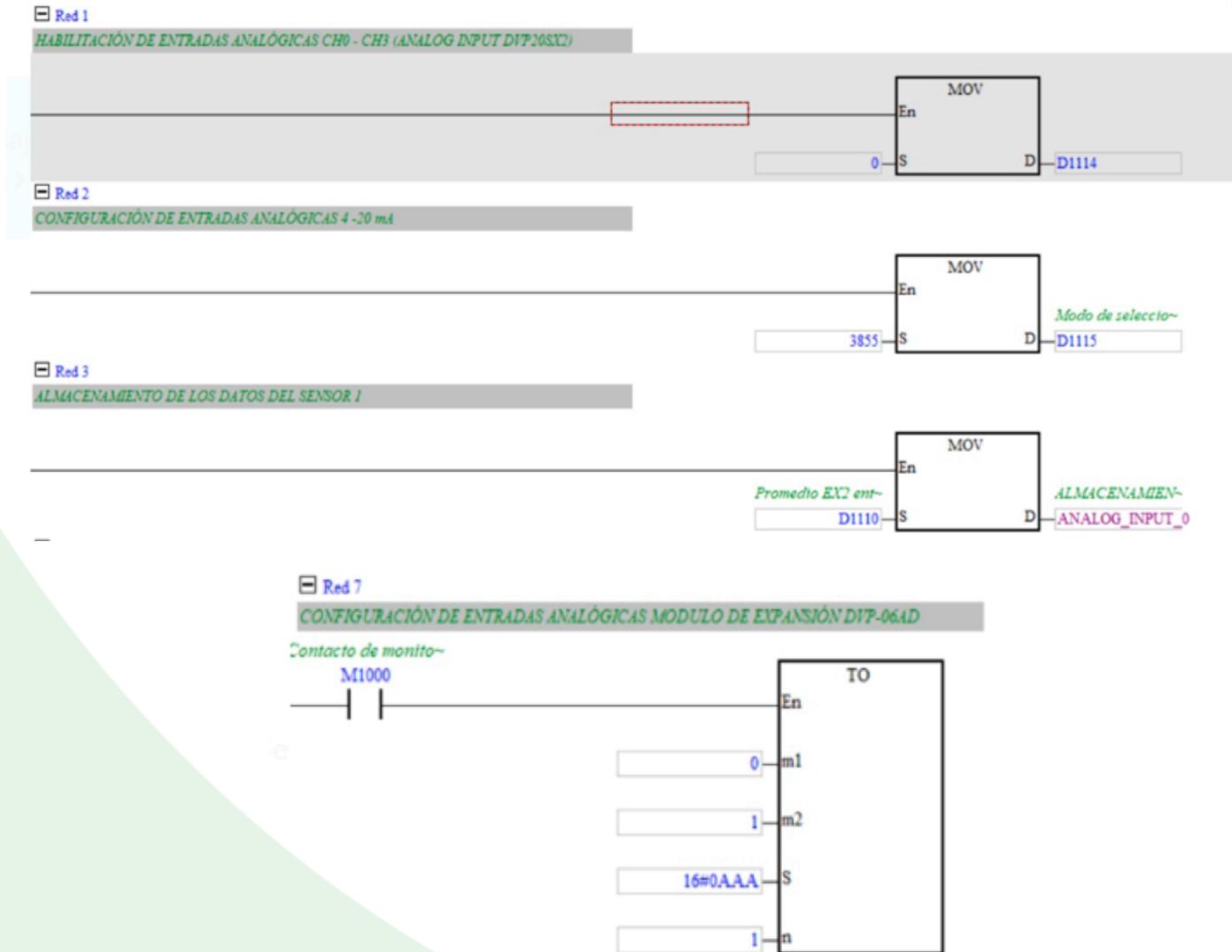


Figura 24. Programación del módulo principal y del sensor 1



ECUADOR

ADQUISICIÓN DE DATOS

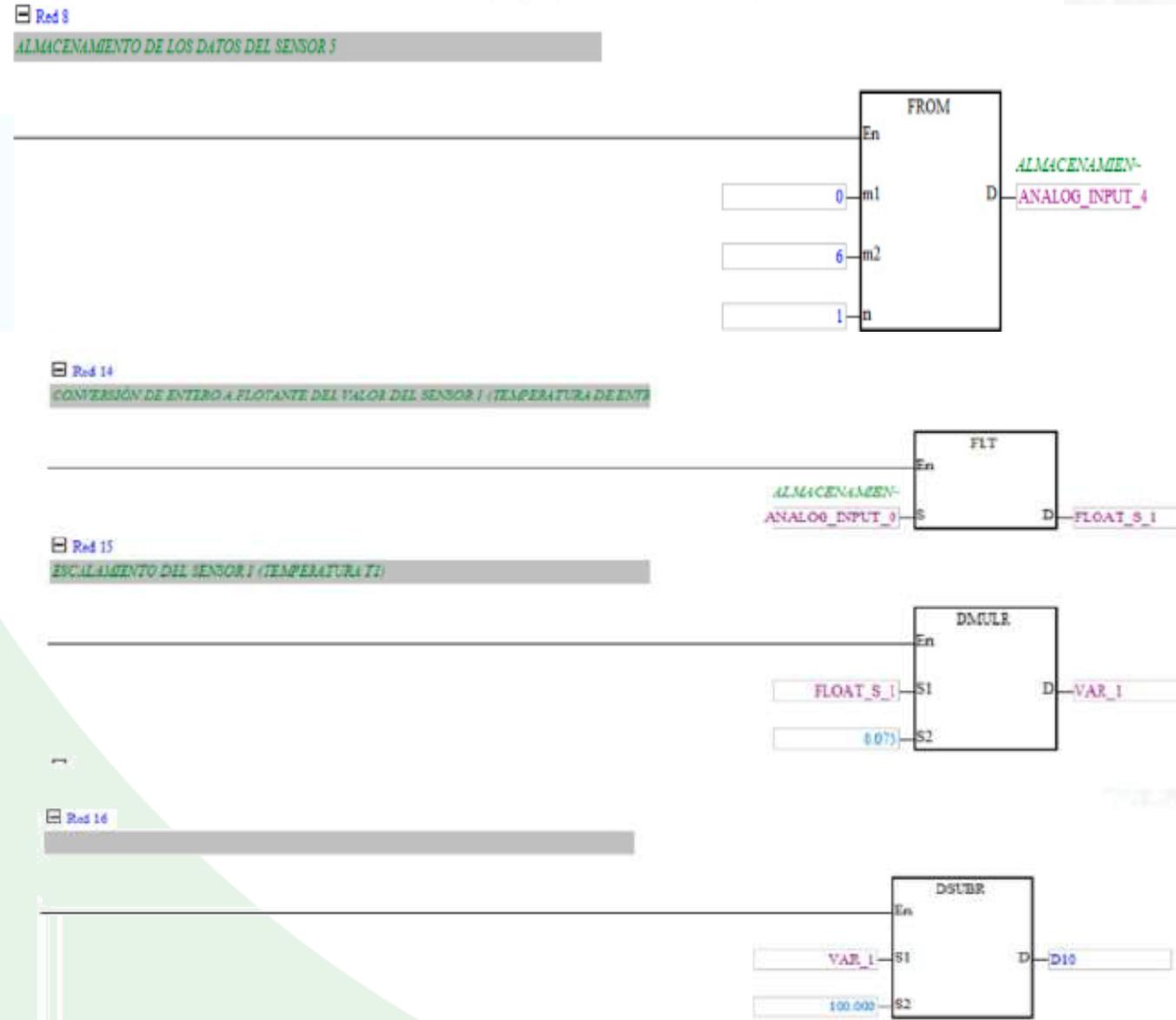


Figura 25. Introducción de ecuaciones de linealización en la programación



ECUADOR

ADQUISICIÓN DE DATOS

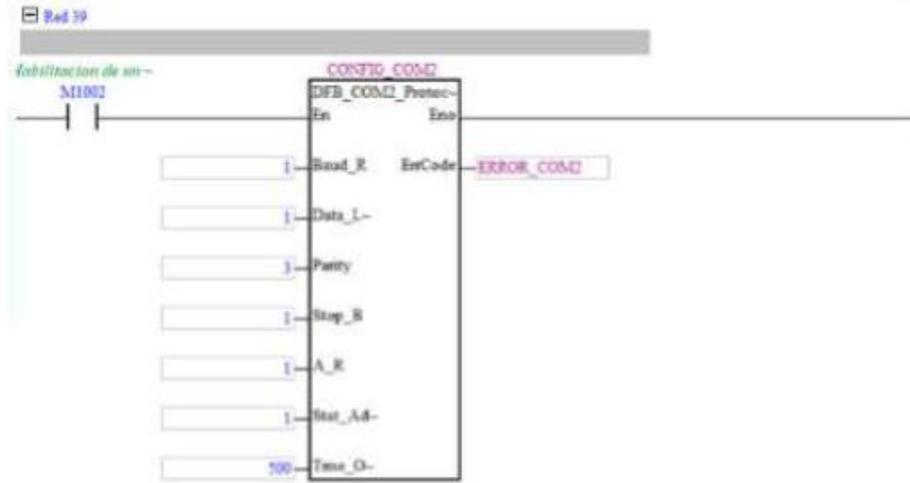


Figura 26. Configuración de la comunicación entre PLC y HMI

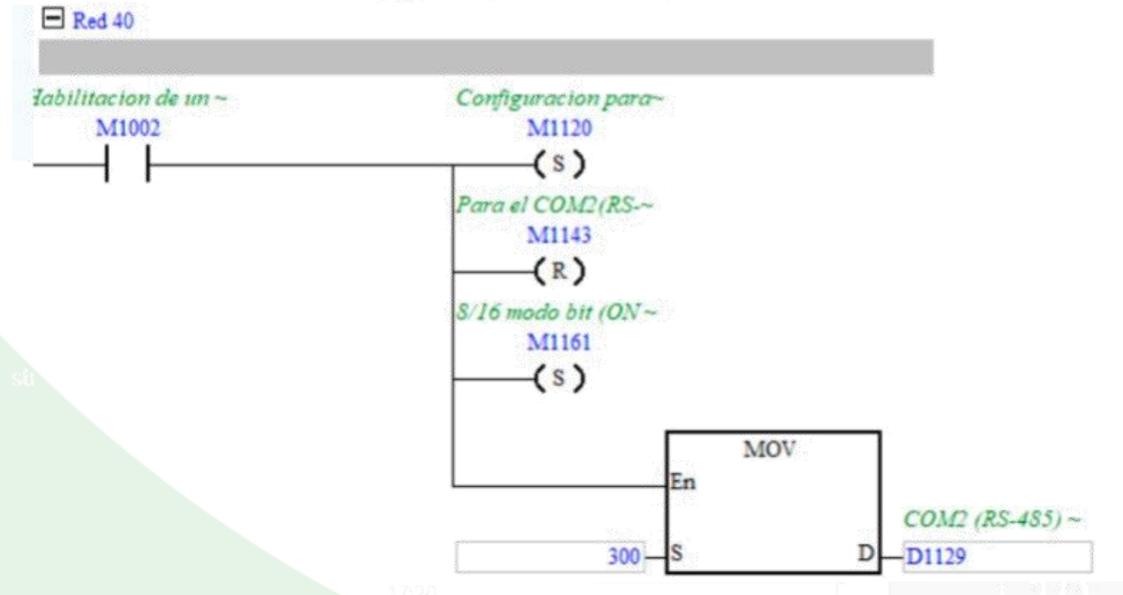


Figura 27. Configuración de la dirección lógica del PLC



INTERFAZ DE USUARIO (HMI)

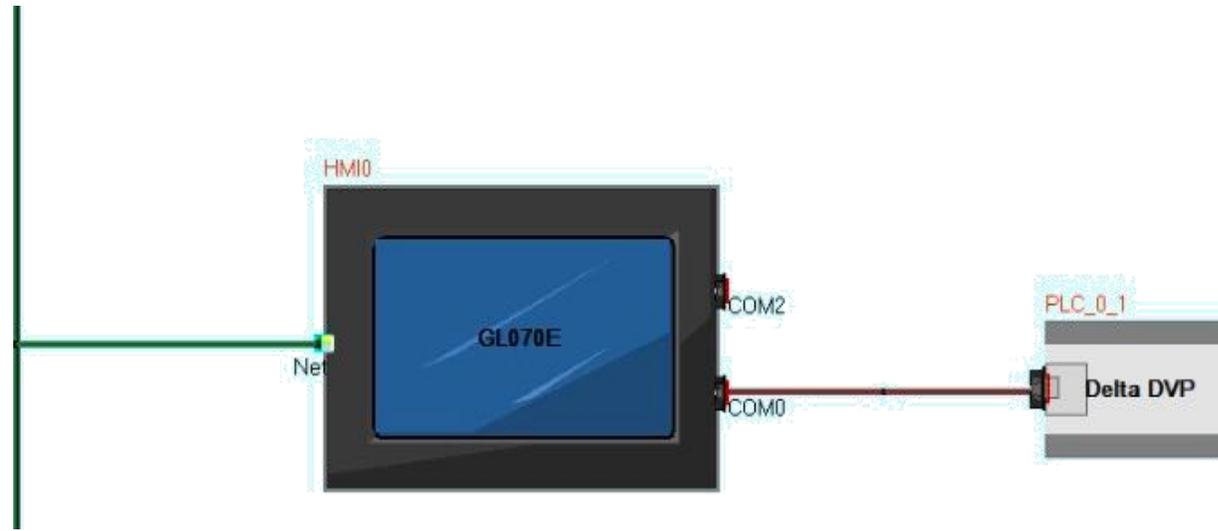


Figura 29. Red de comunicación PLC – HMI

El HMI seleccionado es el Kinco GL070E y dispone de un software propio de uso gratuito llamado Kinco Dtools. Este software permite realizar el diseño de forma sencilla y flexible utilizando las variables previamente configuradas en el PLC, su comunicación entre el HMI y el PLC es sencilla.



Página web para soporte e información del equipo

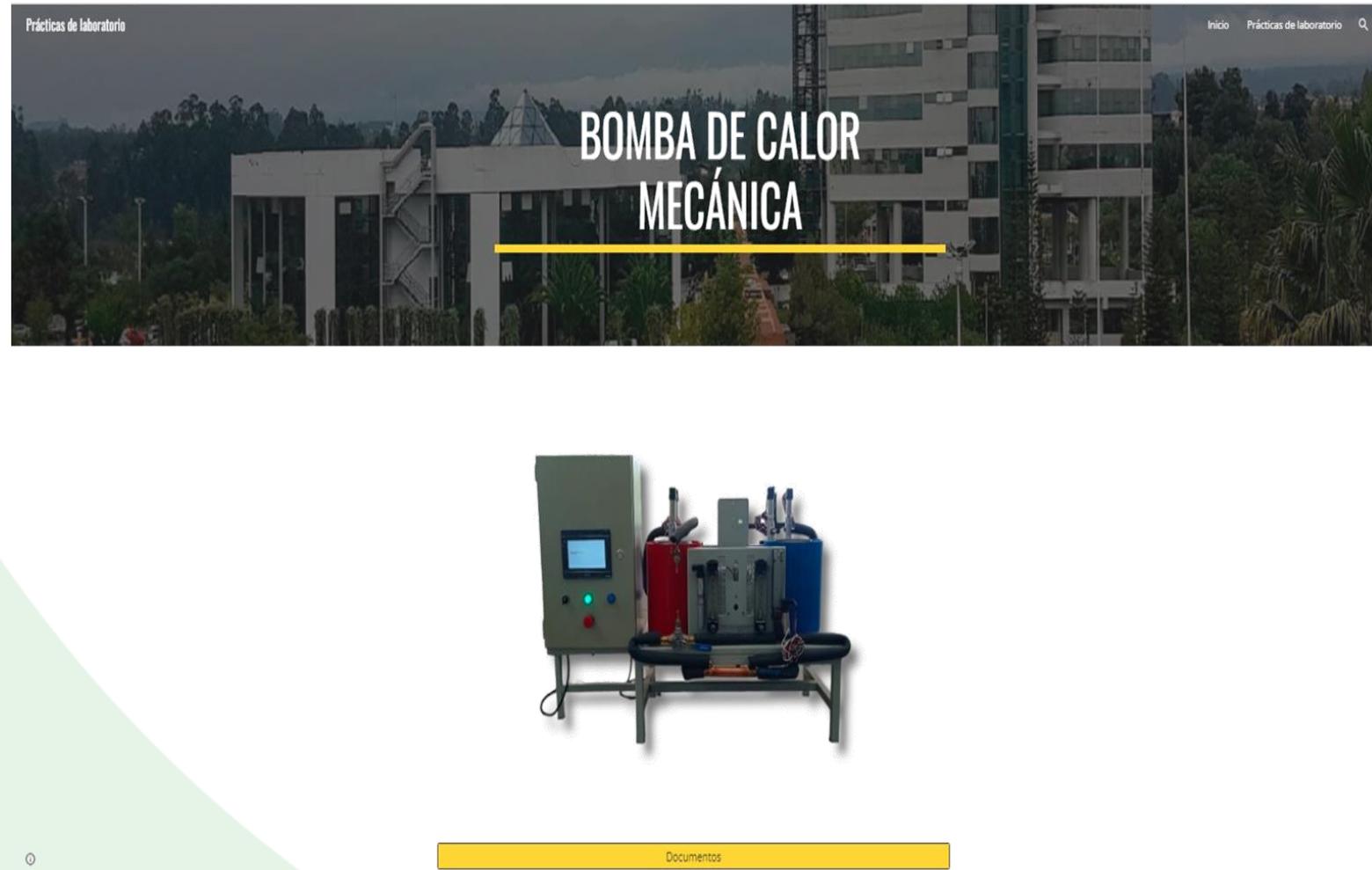


Figura 31. Página Web de la Bomba de Calor Mecánica



Análisis estadístico de sensores de temperatura

Tabla 23. Análisis estadístico

Temperatura	To	Tc	Te	T1	T2	T2'	T3	T4	T4'
h1	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10
h2	17.11	17.09	17.10	17.10	17.10	17.09	17.10	17.11	17.10
h3	17.10	17.10	17.10	17.09	17.11	17.10	17.10	17.10	17.10
h4	17.10	17.10	17.09	17.10	17.10	17.10	17.09	17.10	17.10
h5	17.10	17.10	17.10	17.09	17.09	17.10	17.10	17.11	17.10
h6	17.09	17.10	17.11	17.10	17.11	17.10	17.10	17.10	17.11
h7	17.10	17.09	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10
h8	17.10	17.09	17.10	17.11	17.09	17.10	17.11	17.09	17.10
h9	17.11	17.09	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.11	17.10
h10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10	17.10

Tabla 24. Resultados de análisis

Variable	Valor
n	90
Xmin	17.09
Xmax	17.11
Rango	0.02
Media	17.09
Moda	17.10
Mediana	17.10
σ	0.0052

Tabla 25. Intervalos de clase

N° de clase	Intervalos de clase		M	ni	Ni	fi	Fi
	Límite inferior	Límite superior					
0							
1	17.080	17.088	17.0840	4	4.00	0.04	0.04
2	17.088	17.096	17.0920	13	17.00	0.14	0.19
3	17.096	17.104	17.1000	58	75.00	0.64	0.83
4	17.104	17.112	17.1080	11	86.00	0.12	0.96
5	17.112	17.120	17.1160	4	90.00	0.04	1.00
				90			



Análisis estadístico de sensores de temperatura

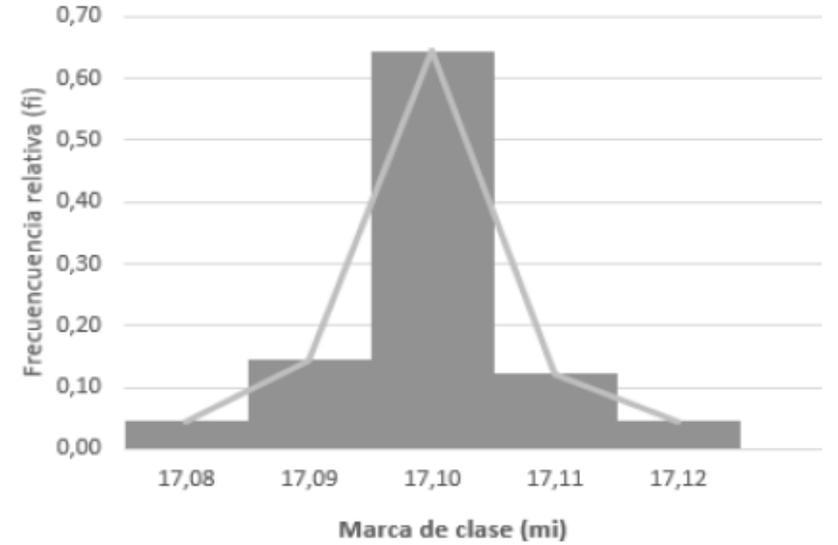
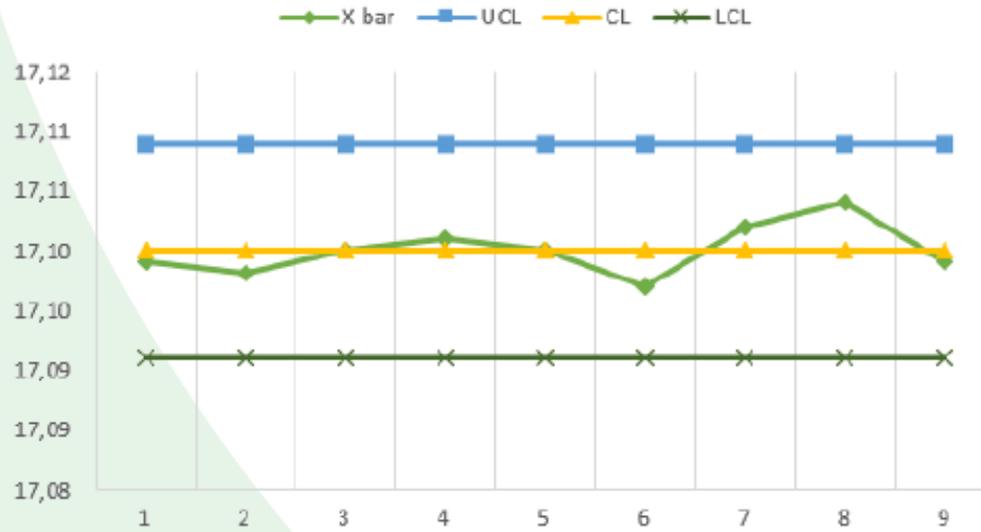


Figura 32. Gráfica de control X barra e histograma con distribución de frecuencias

Vacío, presurización y carga del sistema



Figura 33. Vacío, presurización y carga del sistema



Importancia del rediseño térmico

REDISEÑO TÉRMICO

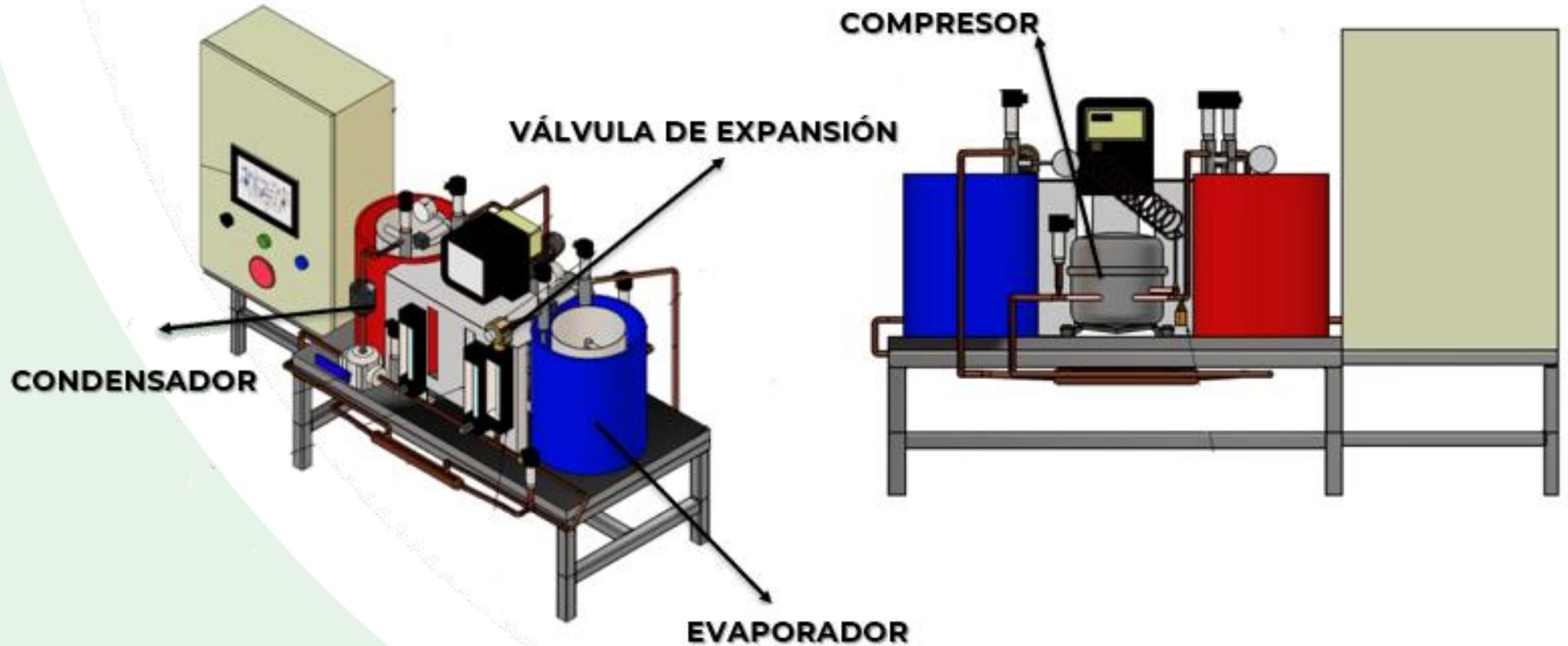


Figura 34. Modelado de la Bomba de Calor Mecánica



Implementar un intercambiador de calor con el fin de conocer cómo varía el COP

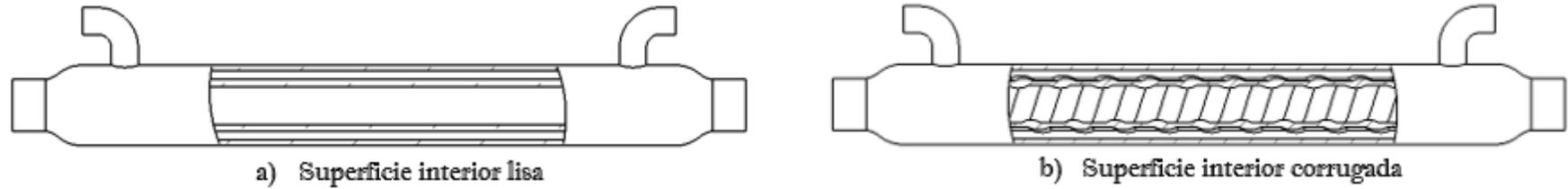


Figura 35. Esquemas de intercambiador de calor de doble tubo

Disposición de los fluidos:

Vapor refrigerante frío
Líquido refrigerante caliente

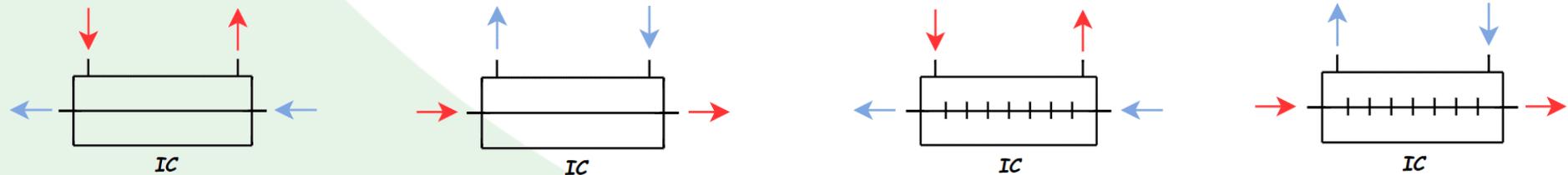


Figura 36. Arreglos para disposición del fluido



Métodos para el dimensionamiento del Intercambiador

Efectividad NTU

- Dimensiones
- Flujo másico
- Temperaturas de entrada

Simulación numérica

- Dimensiones
- Flujo másico
- Temperaturas de entrada

Tabla 26. Datos iniciales para el diseño

Parámetro	Símbolo	Valor
Temperatura fluido caliente	$T_{h_{ent}} = T_4$	37.40 °C
Temperatura fluido frío	$t_{c_{ent}} = T_2$	2.70 °C
Flujo másico	$\dot{m}_h = \dot{m}_c$	15 kg/hr

Tabla 27. Dimensiones geométricas del Intercambiador de calor

Parámetro	Tubo exterior	Tubo interior
Diámetro externo	$D_o = 28.60 \text{ mm}$	$d_o = 18.28 \text{ mm}$
Espesor de pared	$E = 1.40 \text{ mm}$	$e = 1.20 \text{ mm}$
Diámetro interno	$D_i = 25.80 \text{ mm}$	$d_i = 15.88 \text{ mm}$
Longitud útil	$L_u = 210 \text{ mm}$	$l_u = 210 \text{ mm}$



Figura 37. Intercambiador de calor

Método de Efectividad NTU

Tabla 28. Efectividad y transferencia de calor para arreglo 1

Variable	Símbolo	Unidad
Efectividad	ε	4.41 %
Razón transferencia de calor	\dot{Q}	5.79 W
Salida temperatura caliente	$T_{h_{sal}}$	36.46 °C
Salida temperatura fría	$t_{c_{sal}}$	4.23 °C

Tabla 29. Efectividad y transferencia de calor para arreglo 2

Variable	Símbolo	Unidad
Efectividad	ε	3.62 %
Razón transferencia de calor	\dot{Q}	4.76 W
Salida temperatura caliente	$T_{h_{sal}}$	36.63 °C
Salida temperatura fría	$t_{c_{sal}}$	3.96 °C

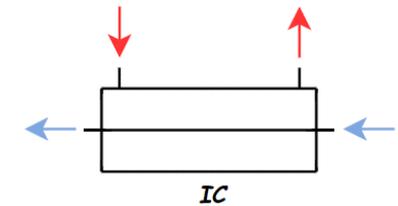


Figura 38. Arreglo 1 de intercambiador

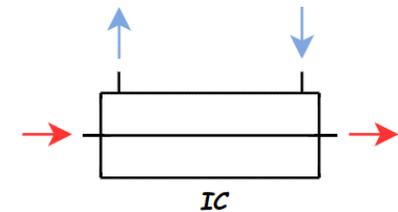


Figura 39. Arreglo 2 de intercambiador

Simulación Numérica

Tabla 30. Efectividad y transferencia de calor para arreglo 3

Variable	Símbolo	Unidad
Efectividad	ϵ	18.30 %
Razón transferencia de calor	\dot{Q}	24.03 W
Salida temperatura caliente	$T_{h_{sal}}$	33.93 °C
Salida temperatura fría	$t_{c_{sal}}$	9.05 °C

Tabla 31. Efectividad y transferencia de calor para arreglo 4

Variable	Símbolo	Unidad
Efectividad	ϵ	30.30 %
Razón transferencia de calor	\dot{Q}	39.78 W
Salida temperatura caliente	$T_{h_{sal}}$	29.71 °C
Salida temperatura fría	$t_{c_{sal}}$	13.23 °C

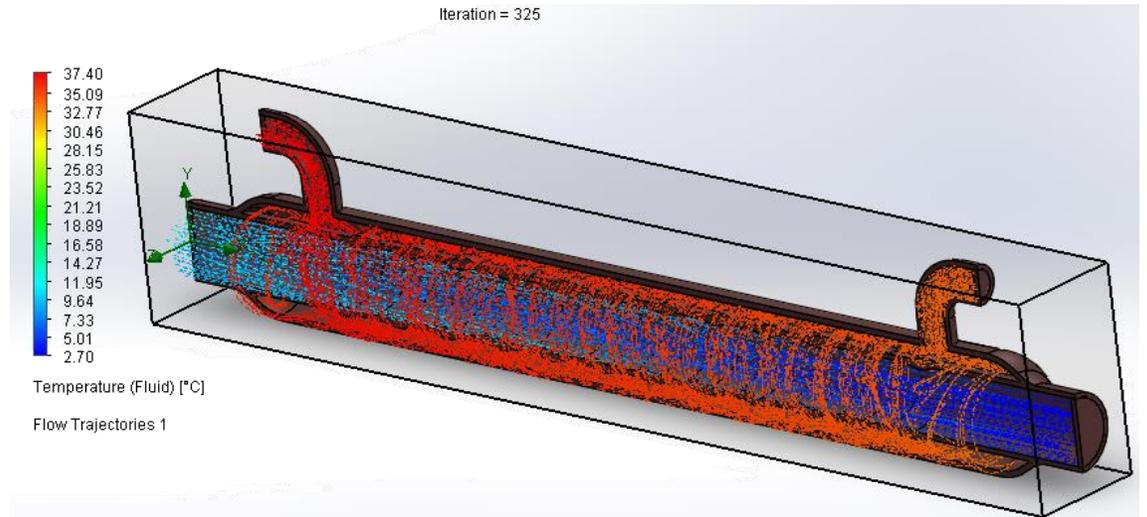


Figura 40. Arreglo 3 de intercambiador

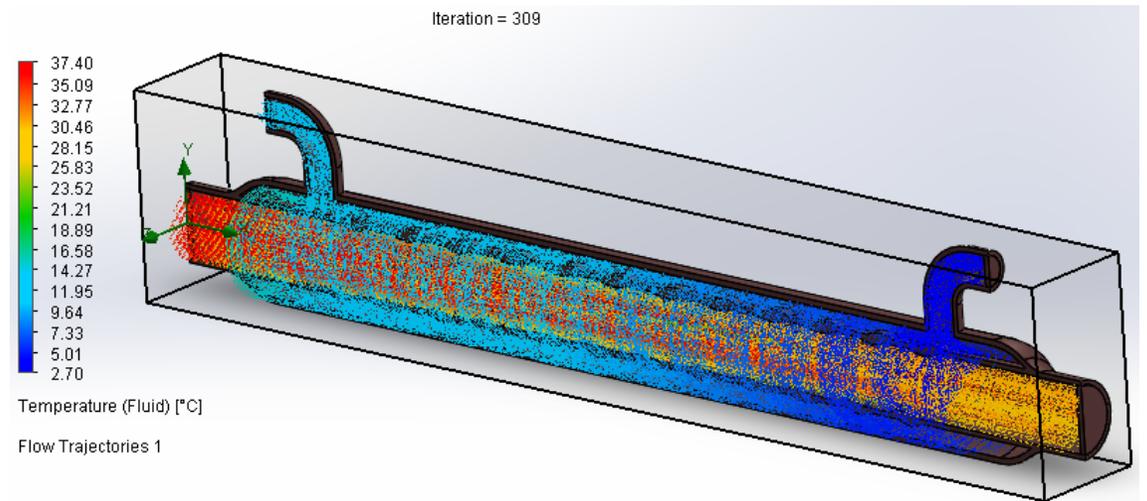


Figura 41. Arreglo 4 de intercambiador



Sobrecalentamiento y Subenfriamiento

Tabla 32. Subenfriamiento para cada arreglo

Arreglo	$T_{h_{ent}}$	$T_{h_{sal}}$	Subenfriamiento
1		36.46 °C	0.94 °C
2	37.40 °C	36.63 °C	0.77 °C
3		33.93 °C	3.47 °C
4		29.71 °C	7.69 °C

Tabla 33. Sobrecalentamiento para cada arreglo

Arreglo	$t_{c_{ent}}$	$t_{c_{sal}}$	Sobrecalentamiento
1		4.23 °C	1.53 °C
2	2.70 °C	3.96 °C	1.26 °C
3		9.05 °C	6.35 °C
4		13.23 °C	10.53 °C

Rangos recomendados:

*Sobrecalentamiento de 6°C a 7°C
Subenfriamiento de 3°C a 8°C*

Tabla 34. Efectividad y transferencia de calor para cada arreglo

Arreglo	$T_{h_{sal}}$	$t_{c_{sal}}$	\dot{Q}	ϵ
1	36.46 °C	4.23 °C	5.79 W	4.41 %
2	36.63 °C	3.96 °C	4.76 W	3.62 %
3	33.93 °C	9.05 °C	24.03 W	18.30 %
4	29.71 °C	13.23 °C	39.78 W	30.30%



Ubicación del intercambiador de calor en el ciclo

Ciclo convencional:

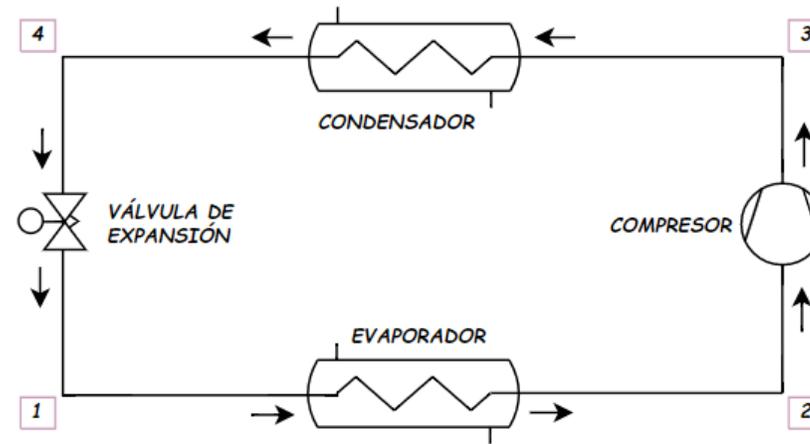


Figura 42. Ciclo sin intercambiador de calor

Ciclo con intercambiador de calor:

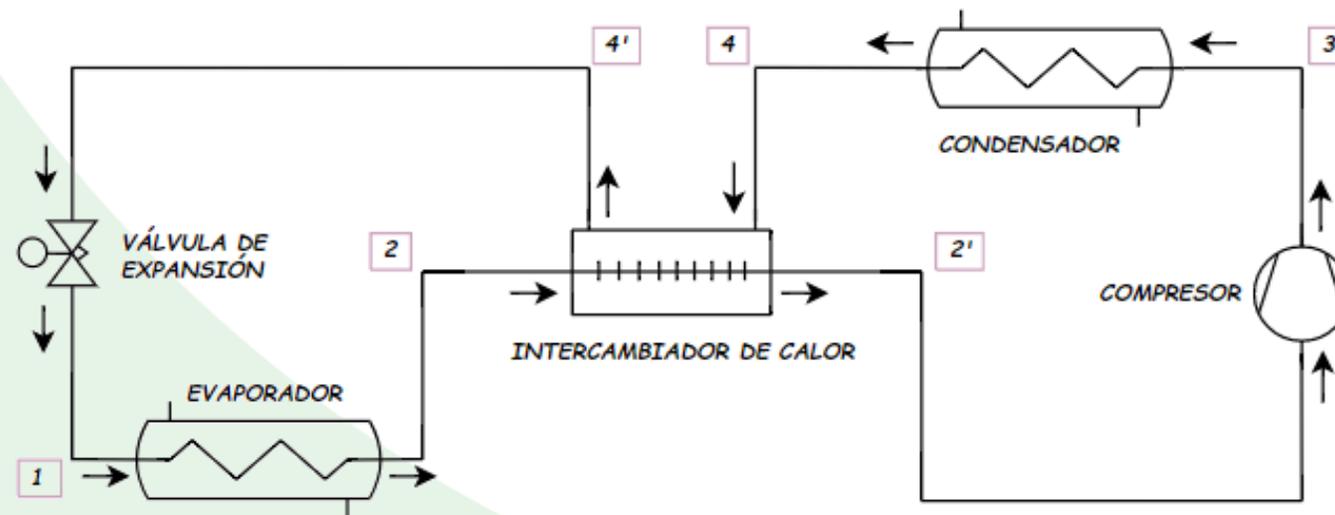


Figura 43. Ciclo con intercambiador de calor



Perdidas de presión en el sistema

Tabla 35. Cálculos de la caída de presión del sistema

Línea	Accesorio	Cant	Caída de presión [bar]
Descarga	Tubería 3/8"	1.50 [m]	0.0040
	Serpentín 1/2"	6.00 [m]	0.0030
Líquido	Filtro deshidratador 3/8"	1	0.0002
	Válvula tres vías 1/2"	1	0.0070
	Intercambiador (líquido) 3/8"	1	0.0010
	Válvula check	1	0.0460
	Tubería 3/8"	2.50 [m]	0.0004
Succión	Serpentín 1/2"	6.00 [m]	0.0080
	Intercambiador (vapor) 5/8"	1	0.0020
	Tubería 3/8"	2.50 [m]	0.0160

Caídas de presión despreciables:

Línea de líquido de 0.06 [bar]

Línea de succión de 0.02 [bar]



Figura 44. Coolselector Danfoss



Manipulación del equipo

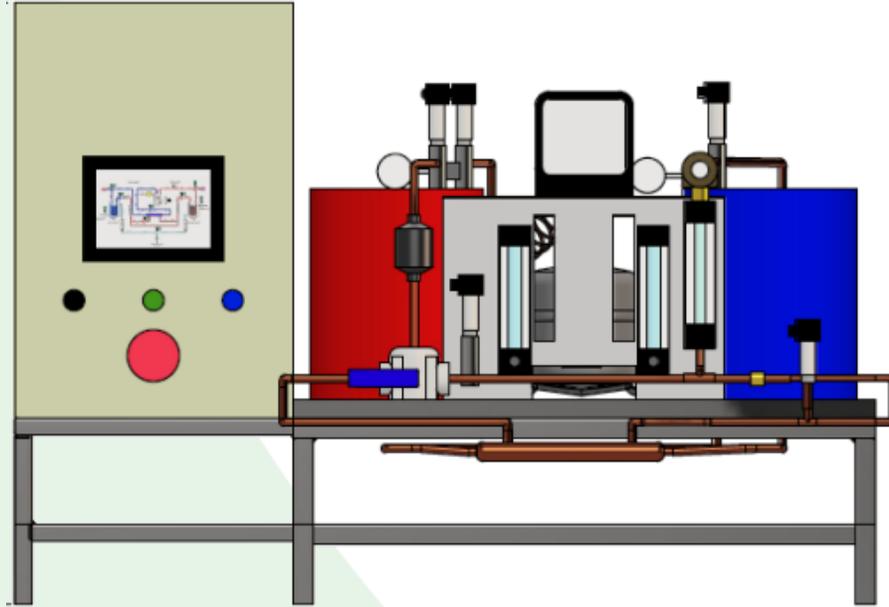


Figura 45. Modelado de la Bomba de Calor

1. Abrir la válvula de bola para agua
2. Ajustar el flujo de agua requerido
3. Colocar la válvula de tres vías en posición
4. Encienda el equipo con el selector
5. Ajustar flujo de refrigerante requerido
6. Esperar 30 min (estado de equilibrio)
7. En la pantalla elegir el tipo de proceso
8. Cada 8 min se registra datos del proceso



Codificación para las pruebas

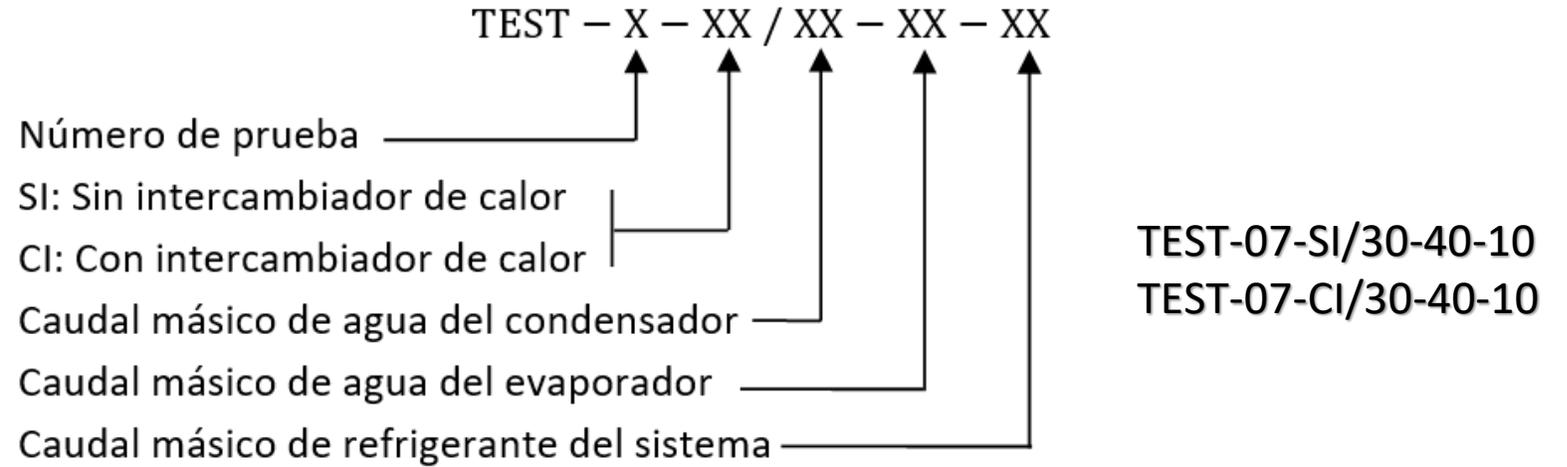


Figura 46. Codificación para las pruebas de funcionamiento

Tabla 36. Variables iniciales para pruebas de funcionamiento

Ciclo sin intercambiador de calor		
Componente	Variable	Cantidad
Agua en el condensador	\dot{m}_c	30 kg/hr
Agua en el evaporador	\dot{m}_e	40 kg/hr
Refrigerante en el sistema	\dot{m}_{r134a}	10 kg/hr



Ejemplo:

TEST-07-SI/30-40-10

TEST-07-CI/30-40-10

Tabla 37. Resultados para TEST-07-SI/30-40-10

Ciclo sin intercambiador de calor					
Fluido	Descripción	Símbolo	Presión	Símbolo	Temperatura
R134a	Entrada del evaporador	P_1	2.23 bar	T_1	-16.30 °C
	Salida del evaporador	P_2	2.23 bar	T_2	9.96 °C
	Entrada del condensador	P_3	10.24 bar	T_3	75.89 °C
	Salida del condensador	P_4	10.24 bar	T_4	30.17 °C
Fluido	Descripción	Símbolo	Temperatura		
H ₂ O	Suministro de red	T_o	19.76 °C		
	Salida del condensador	T_c	37.78 °C		
	Salida del evaporador	T_e	8.85 °C		
Descripción		Símbolo	Trabajo		
Trabajo del compresor		W_{real}	157.87 W		

Tabla 38. Resultados para TEST-07-CI/30-40-10

Ciclo con intercambiador de calor					
Fluido	Descripción	Símbolo	Presión	Símbolo	Temperatura
R134a	Entrada del evaporador	P_1	2.23 bar	T_1	-15.03 °C
	Salida del evaporador	P_2	2.23 bar	T_2	11.05 °C
	Salida del intercambiador (vapor)	$P_{2'}$	2.23 bar	$T_{2'}$	18.67 °C
	Entrada del condensador	P_3	10.32 bar	T_3	79.78 °C
	Salida del condensador	P_4	10.32 bar	T_4	31.90 °C
	Salida del intercambiador (líquido)	$P_{4'}$	10.32 bar	$T_{4'}$	28.64 °C
Fluido	Descripción	Símbolo	Temperatura		
H ₂ O	Suministro de red	T_o	19.74 °C		
	Salida del condensador	T_c	38.72 °C		
	Salida del evaporador	T_e	10.64 °C		
Descripción		Símbolo	Trabajo		
Trabajo del compresor		W_{real}	154.13 W		



Diagramas de Mollier

RESULTADOS

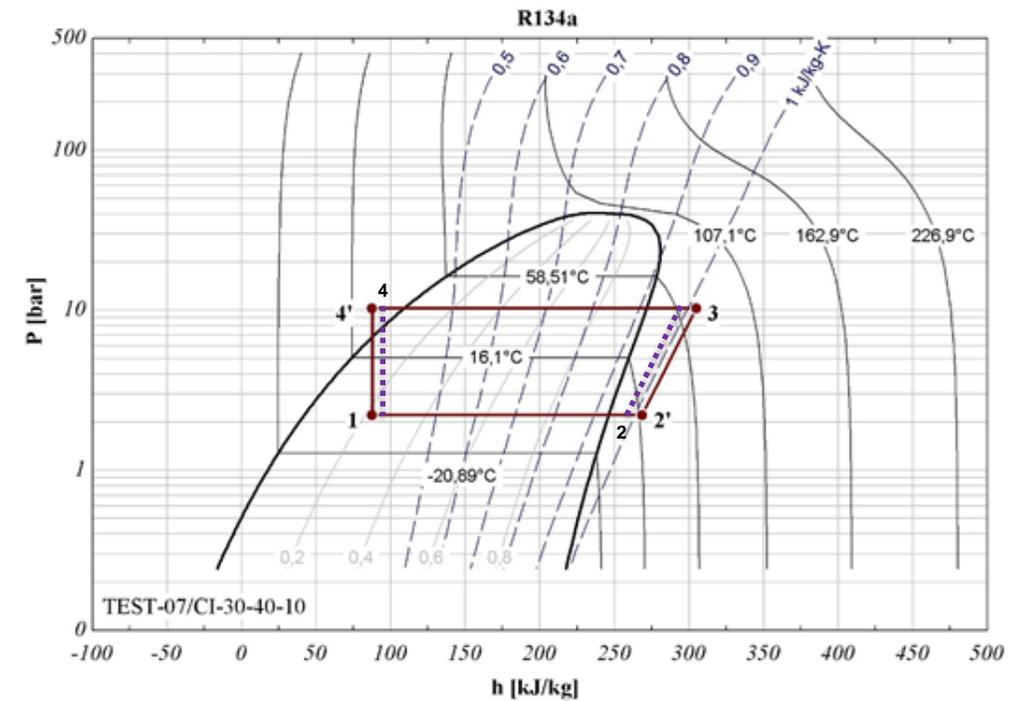
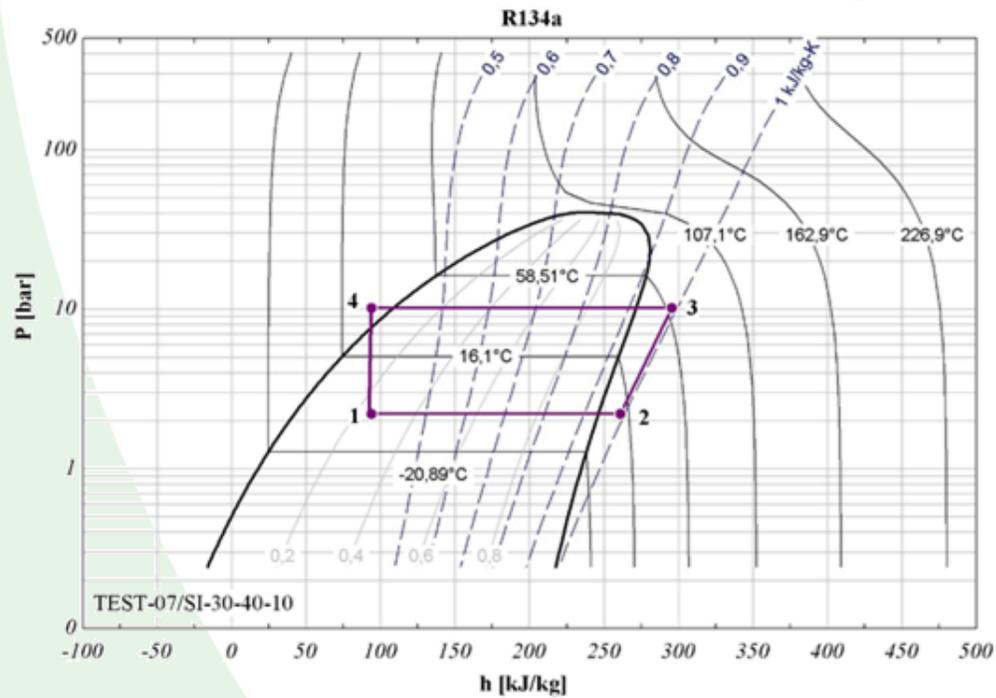


Figura 47. Comparación de diagrama de Mollier en ciclo sin y con intercambiador

ESS

Tabla 39. Comparación de resultados

Figura 48. Software ESS

Resultados para las pruebas realizadas		
Variable	Sin intercambiador	Con intercambiador
Qc [W]	560.60	592.00
Qe [W]	464.40	491.50
Qrad [W]	61.72	53.63
Wreal [W]	157.87	154.13
Wideal [W]	96.15	100.50
η_{mec}	0.61	0.65
Scal [°C]	17.26	25.97
Senf [°C]	10.08	11.90
COP _{BC}	3.55	3.84
COP _{REF}	2.94	3.19

Sobrecalentamiento y subenfriamiento adicional (Intercambiador de calor)

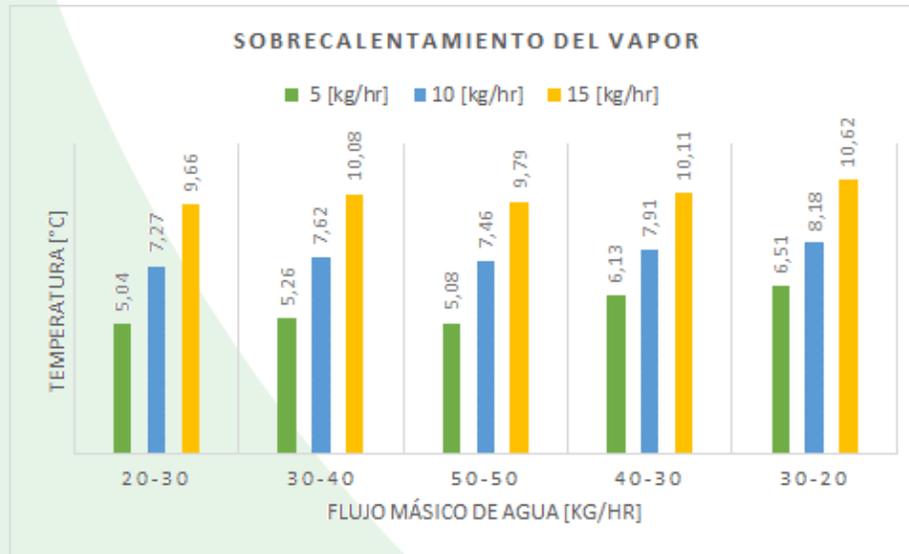


Figura 49. Sobrecalentamiento del vapor

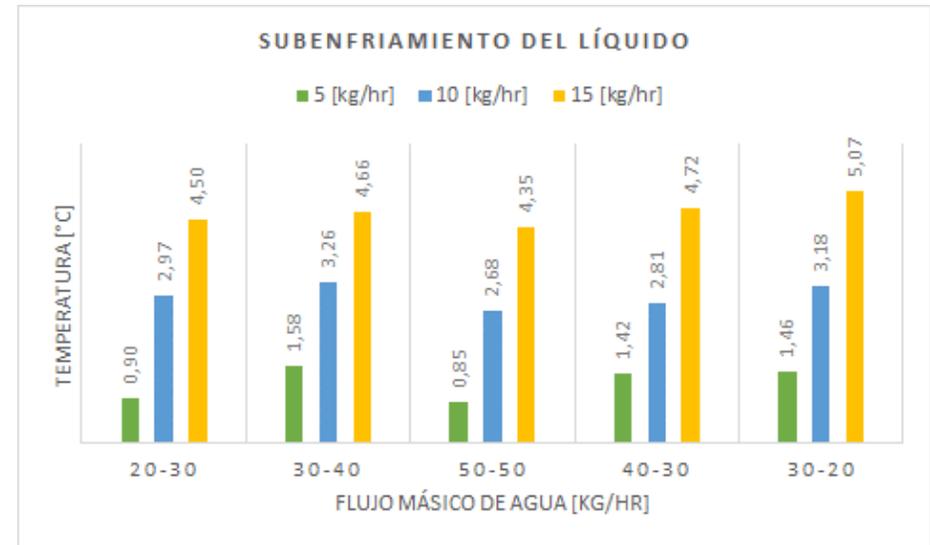


Figura 50. Subenfriamiento del líquido



Sobrecalentamiento total, subenfriamiento total y COP



Figura 51. Comparación de sobrecalentamiento total, subenfriamiento total y COP



Comparación entre procesos (Efecto refrigerante vs COP)

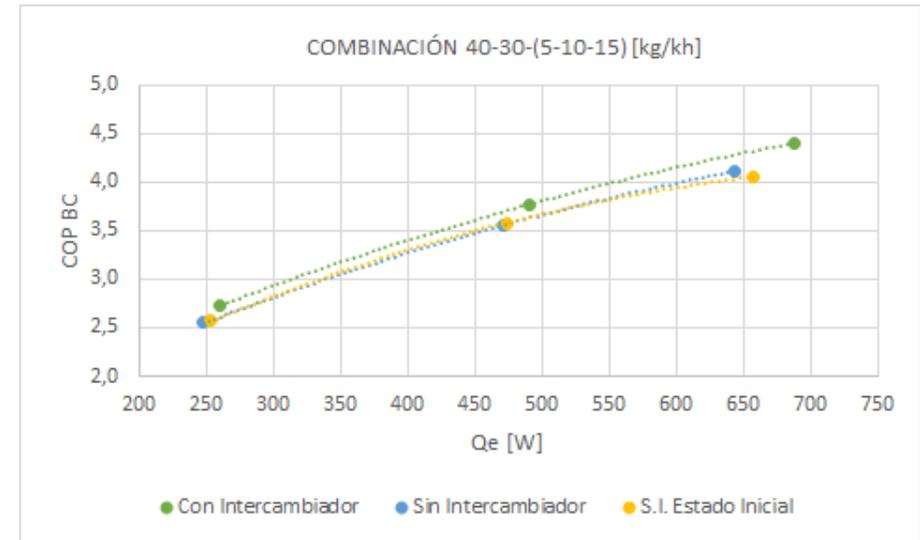
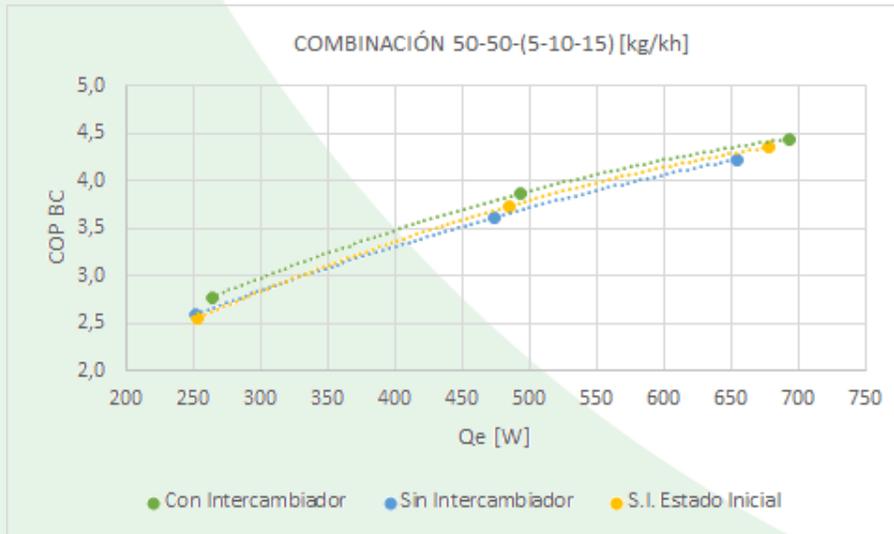
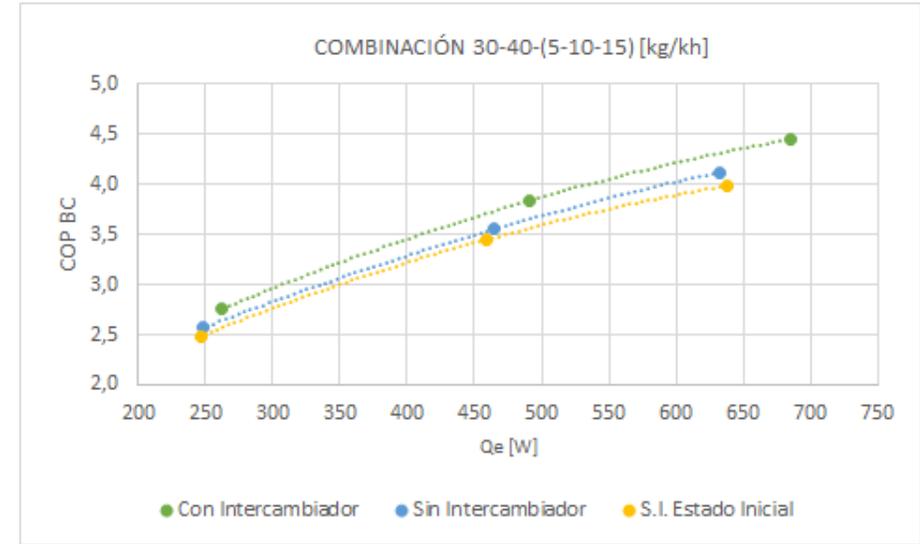
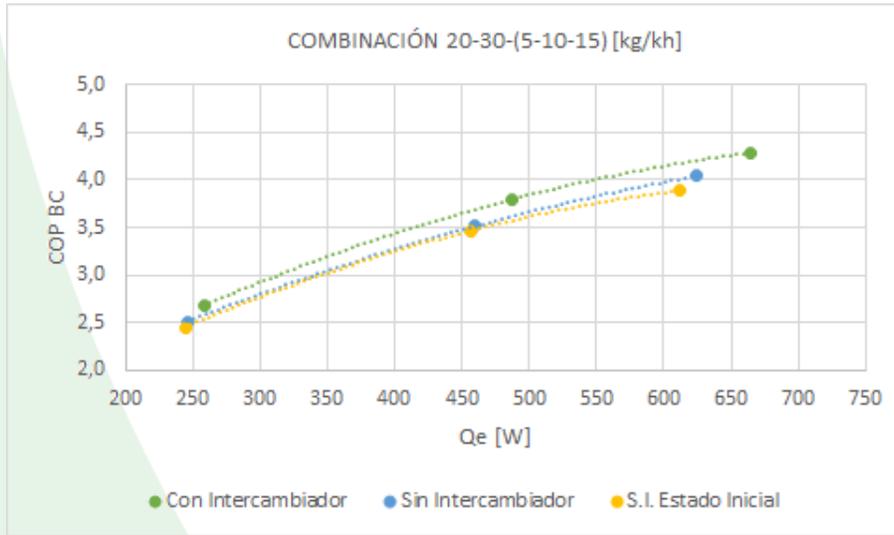


Figura 52. Comparación entre proceso con intercambiador, sin intercambiador y estado inicial



Comparación entre procesos (Efecto refrigerante vs COP)

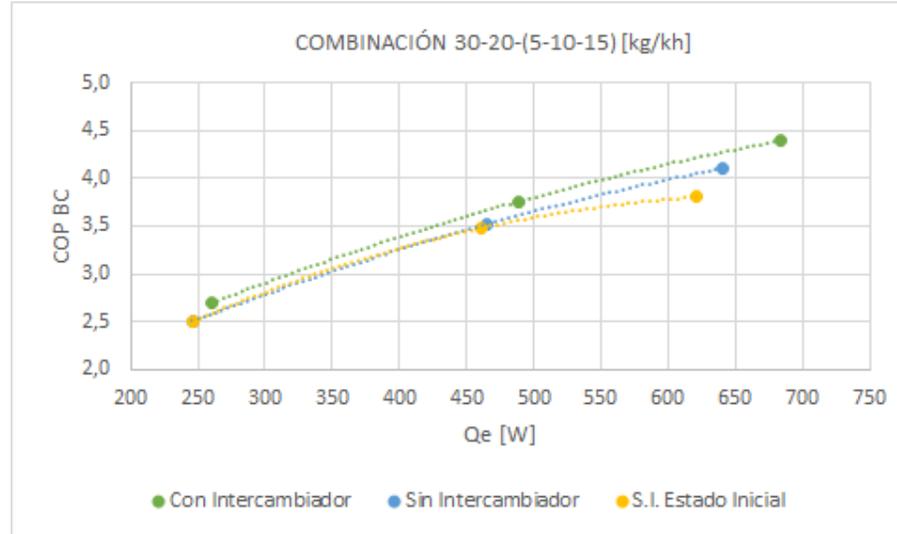


Figura 53. Comparación entre proceso con intercambiador, sin intercambiador y estado inicial

De las gráficas que relacionan el COP_{BC} vs Q_e (efecto refrigerante) se evidencia que ambas variables están directamente relacionadas entre sí, ya que a medida que aumenta el efecto refrigerante, aumenta también el coeficiente de operación.

Equipo repotenciado



Figura 54. Repotenciación del Equipo Bomba de Calor Mecánica



CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio técnico del estado inicial del equipo, en el que se determinó el desgaste de sus principales componentes y la falta de mantenimiento; además de demostrar que el proceso de adquisición de datos mediante instrumentos analógicos es ineficiente debido al gran número de variables a medir.
- En la repotenciación de la bomba de calor mecánica se diseñó y fabricó la estructura soporte, se incorporó un intercambiador de calor en el ciclo de refrigeración; además, se cambiaron los principales elementos del equipo, como el aceite del compresor, el filtro secador y la incorporación de varios accesorios necesarios para su correcto funcionamiento.



CONCLUSIONES

- Para la puesta en marcha del equipo, se llevó a cabo el proceso de vacío del sistema, presurización y carga de refrigerante R134a, tal y como indica el proveedor; además de aislar térmicamente todas las tuberías de cobre para asegurar que no existan pérdidas de calor que influyan negativamente en la adquisición de datos.
- La incorporación del intercambiador de calor en el ciclo hace que tanto el efecto de calentamiento como el de enfriamiento aumenten en comparación con el ciclo sin intercambiador; esto hace que el coeficiente de operación COP también aumente, gracias al sobrecalentamiento y subenfriamiento adicionado al sistema; esta tendencia se mantiene para cualquier cantidad de flujo másico de refrigerante.



CONCLUSIONES

- Las pérdidas de calor a las superficies adyacentes o al medio ambiente en las líneas de líquido y succión se reducen al incorporar el intercambiador de calor, ya que estas pérdidas se aprovechan en el intercambio térmico entre el refrigerante como vapor frío y líquido caliente.
- En cuanto a la adquisición de datos del equipo, se incorporaron 9 sensores de temperatura, 2 sensores de presión y un sensor de consumo eléctrico, que facilitan las mediciones del ciclo ya que adquieren los datos a través del controlador con sus respectivos módulos y se visualizan fácilmente en la pantalla incorporada.
- Con el fin de garantizar un entorno pedagógico para la adquisición de datos, se incorporó una interfaz hombre-máquina intuitiva para los estudiantes, que incluye esquemas de los ciclos de análisis y un código QR con toda la información técnica, guías de laboratorio, manual de usuario e información de apoyo sobre el funcionamiento del equipo.



RECOMENDACIONES

- Para garantizar el correcto funcionamiento del equipo durante su uso, se recomienda seguir las instrucciones especificadas en el manual de usuario, así como la realización progresiva de su mantenimiento.
- Se recomienda visitar la página web del equipo, donde podrá encontrar información que facilite la comprensión e interpretación de su sistema. Así como los gráficos, plantillas y software necesarios para realizar los cálculos que conllevan las guías de laboratorio.
- Siguiendo los pasos especificados en el manual de usuario, se recomienda esperar 30 minutos tras la puesta en marcha inicial, ya que el equipo requiere este tiempo para alcanzar su estado de equilibrio; si no se respeta este tiempo, los datos obtenidos no mostrarán la tendencia real de su funcionamiento.
- No encienda el equipo sin antes habilitar el flujo de agua a los tanques de condensación y evaporación, ya que esto puede causar daños al compresor al elevar su temperatura y presión de operación.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. (2013). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Bolton, W. (2013). *Mecatrónica Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica* (5th ed.). Alfaomega.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (7th ed.). McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Creus, A. (2011). *Instrumentación Industrial* (8th ed.). Alfaomega.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (4th ed.). Pearson Educación de México.
- Kern, D. Q. (1999). *Procesos de Transferencia de Calor* (1st ed.). Compañía Editorial Continental.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2011). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Pitts, D. R., & Sissom, L. E. (1998). *Heat Transfer* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- SEMARNAT. (2006). *Buenas Prácticas en Sistemas de Refrigeración y Aire Acondicionado* [Archivo PDF]. <http://apps2.semarnat.gob.mx:8080/sissao/archivos/ManualBuenasPracticas2.pdf>

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



***GRACIAS POR SU
ATENCIÓN***