



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE UN SISTEMA
DE REFRIGERACIÓN”**

AUTORES:

BENAVIDES GALLEGOS, JOEL SEBASTIAN

CHÁVEZ GUERRERO, BRYAN FERNANDO

REYES UTRERAS, JOSÉ DANIEL

YÉPEZ ROSERO, GANDHY DAVID

DIRECTOR:

ING. LUIS MIGUEL CARRIÓN MATAMOROS PhD

SANGOLQUÍ 2022



CONTENIDOS

GENERALIDADES

- DEFINICIÓN DEL PROBLEMA
- OBJETIVOS

METODOLOGÍA

- SELECCIÓN DE TUBERÍA DE REFRIGERACIÓN
- SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE
- PARÁMETROS DE DISEÑO
- SELECCIÓN DE UNIDAD COMPRESORA
- SELECCIÓN DE VÁLVULA DE EXPANSIÓN
- DISEÑO DEL EVAPORADOR
- DISEÑO DEL CONDENSADOR
- SELECCIÓN DE BOMBAS

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

- ESTRUCTURA METÁLICA
- TANQUES DE ALMACENAMIENTO
- SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
- SISTEMA DE ALIMENTACIÓN



CONTENIDOS

SISTEMA DE CONTROL

- SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRATEGIA DE CONTROL Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA
- COMPLEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL
- ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE CONTROL
- PLACA PCB
- COMPONENTES ELÉCTRICOS DE SISTEMA DE CONTROL
- CIRCUITO DE CONTROL
- CIRCUITO DE POTENCIA

SOFTWARE

- DISEÑO DEL HMI
- INTERFÁZ MÁQUINA HOMBRE HMI

PUESTA A PUNTO

- PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
- PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA DE CONTROL

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

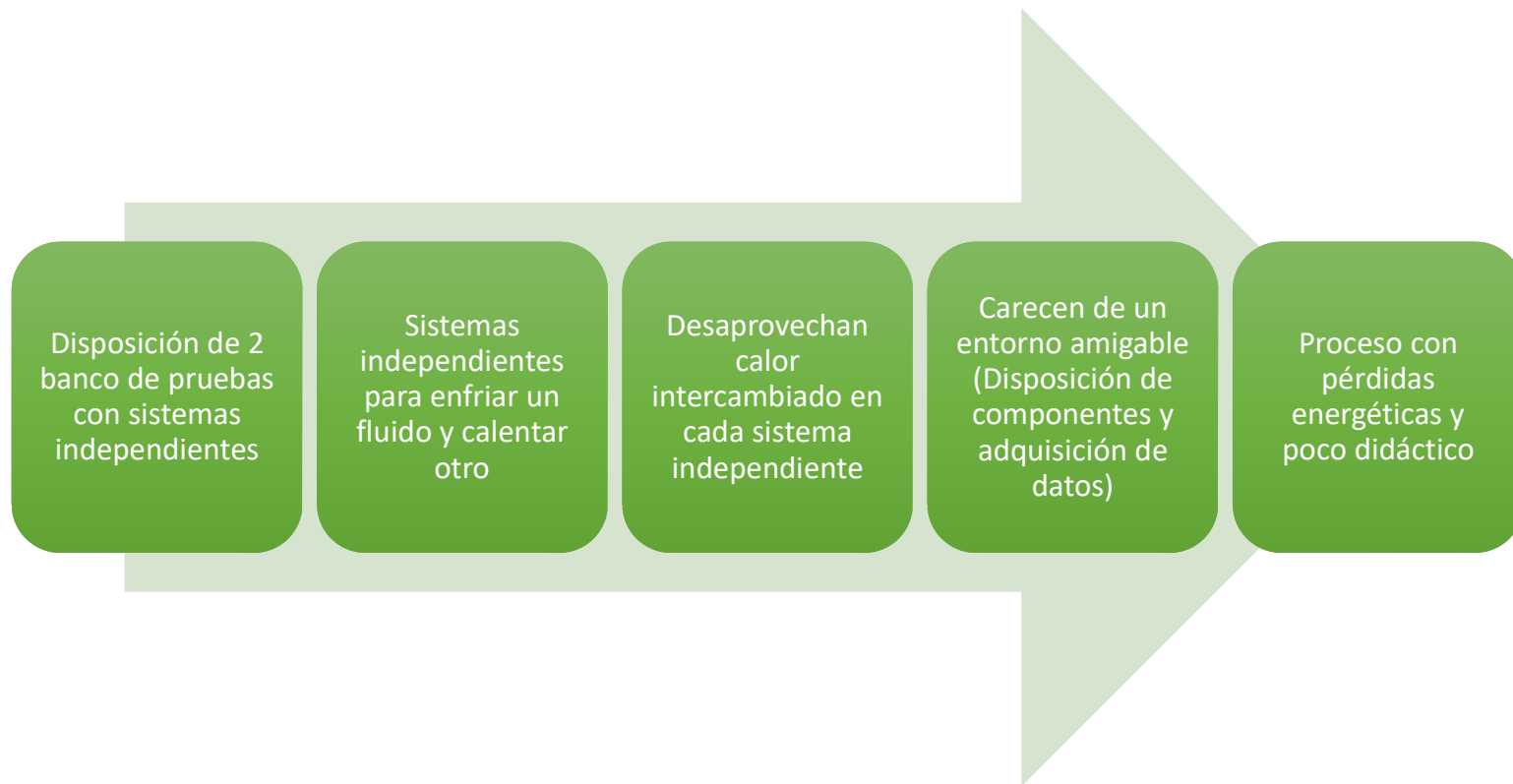
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



GENERALIDADES



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA



GENERALIDADES



OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un banco de pruebas de un sistema de refrigeración.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar el estudio bibliográfico y térmico del sistema de refrigeración.
- Estudiar la dinámica de sistemas en el proceso fluido - térmico para aplicar el control adecuado.
- Diseñar mediante balance energético el banco de pruebas del sistema de refrigeración.
- Diseñar el sistema de control en base a las señales de entrada y de salida del sistema de refrigeración.
- Construir el banco de pruebas para el sistema de refrigeración e implementación del sistema de control y adquisición de datos.
- Realizar las pruebas experimentales de comprobación de funcionamiento usando un intercambiador de calor de tubo concéntrico.

GENERALIDADES



METODOLOGÍA



SELECCIÓN DE TUBERÍA DE REFRIGERACIÓN

Tubería de cobre tipo L, realizado mediante el tratamiento térmico de recocido, tratamiento que posibilita el proceso de manufactura de enrollado debido al aumento de ductilidad.

Tipo de tubería de cobre	Funciones
TIPO K	Vapor y gases industriales
TIPO L	Refrigeración y gas domiciliario
TIPO M	Conducción de agua

EVAPORADOR

Tubería de cobre de 3/8"

CONDENSADOR

Tubería de cobre de 1/2"

SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE

Evaluación de refrigerantes según punto de ebullición.

Refrigerante	Punto de burbujeo °C	Punto de ebullición menor a 0 °C
22	-41	Si Cumple
134A	-26	Si Cumple
141B	32	No cumple
290	-42	Si Cumple
404A	-46,6	Si Cumple
406A	-32,7	Si Cumple
407C	-43,8	Si Cumple
409A	-36,5	Si Cumple
410A	-51,6	Si Cumple
M049/437 A	-32,9	Si Cumple
507	-46,7	Si Cumple
600A	-12	Si Cumple

Evaluación de refrigerantes según inflamabilidad y toxicidad

Refrigerante	Punto de burbujeo	Grupo de seguridad	Categoría de baja inflamabilidad y no toxico
22	-41	A1	Si Cumple
134A	-26	A1	Si Cumple
290	-42	A3	No Cumple
404A	-46,6	A1	Si Cumple
406A	-32,7	A2	No Cumple
407C	-43,8	A1	Si Cumple
409A	-36,5	A1	Si Cumple
410A	-51,6	A1	Si Cumple
M049/437 A	-32,9	A1	Si Cumple
507	-46,7	A1	Si Cumple
600A	-12	A3	No Cumple

SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE

Criterios de evaluación, refrigerante

ORD	Criterios	Definición	Referencia de calificación
1	Costo de Adquisición	Capital requerido para adquirir el material.	5: menos costoso 1: más costoso
2	Disponibilidad en el mercado nacional	Facilidad de adquisición del material en centros de distribución cercanos.	5: mayor disponibilidad 1: menor disponibilidad
3	Funcionalidad	Capacidad de acoplarse de manera correcta al diseño establecido.	5: mayor funcionalidad 1: menor funcionalidad
4	Propiedades del material	Propiedades del material que aporten para su función.	5: mejores propiedades 1: peores propiedades
5	Medio ambiente	Propiedades para no dañar o contaminar el medio ambiente	5: menor daño ambiental 1: mayor daño ambiental

Matriz de decisión, refrigerante

ORD	Criterios	CALIFICACIÓN (%)					
		OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3	OPCIÓN 4	OPCIÓN 5	OPCIÓN 6
1	Costo de Adquisición	0.69	0.92	0.92	0.46	0.23	0.92
2	Disponibilidad en el mercado nacional	0.84	1.05	0.84	0.42	0.21	0.42
3	Funcionalidad	0.56	0.70	0.56	0.56	0.56	0.56
4	Propiedades del material	0.76	0.95	0.76	0.57	0.38	0.57
TOTAL		2.85	3.62	3.08	2.01	1.38	2.47

Opción 1: R 134 A

Opción 2: R 404 A

Opción 3: R 407 C

Opción 4: R 410 A

Opción 5: R 437 A

Opción 6: R 507

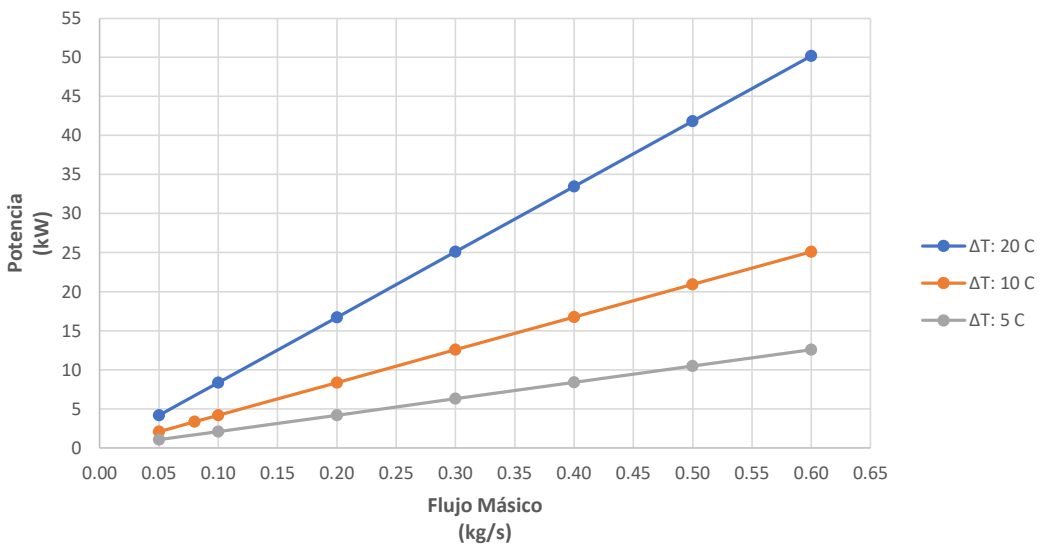
PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetros de trabajo en Agua

Temperatura		Calores Específicos	Flujo Másico	Potencia Requerida	Potencia Requerida
Ti	To				
$\Delta T = 20\text{ C}$					
30	10	4182	0.6	50184	50.18
30	10	4182	0.5	41820	41.82
30	10	4182	0.4	33456	33.46
30	10	4182	0.3	25092	25.09
30	10	4182	0.2	16728	16.73
30	10	4182	0.1	8364	8.36
30	10	4182	0.05	4182	4.18
$\Delta T = 10\text{ C}$					
20	10	4185	0.6	25110	25.11
20	10	4185	0.5	20925	20.93
20	10	4185	0.4	16740	16.74
20	10	4185	0.3	12555	12.56
20	10	4185	0.2	8370	8.37
20	10	4185	0.1	4185	4.19
20	10	4185	0.08	3348	3.35
20	10	4185	0.05	2093	2.09
$\Delta T = 5\text{ C}$					
15	10	4189.5	0.6	12569	12.57
15	10	4189.5	0.5	10474	10.47
15	10	4189.5	0.4	8379	8.38
15	10	4189.5	0.3	6284	6.28
15	10	4189.5	0.2	4190	4.19
15	10	4189.5	0.1	2095	2.09
15	10	4189.5	0.05	1047	1.05

Energía calorífica necesaria en el agua:

$$Q_{\text{refrigeración}} = m_a \cdot C p_a \cdot \Delta T_a$$



Dentro de un rango de 1 Tonelada de refrigeración, siendo este un parámetro de diseño propuesto.

METODOLOGÍA



PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetros de trabajo en Aceite

Temperatura (°C)		Calores Específicos (J/kg K)	Flujo Másico (kg/s)	ENERGIA UTILIZADA PARA DISMINUIR UN ΔT DE ACEITE (kW)
Ti	To			
35	45	1950	0.172	
40	50	1985	0.1687	3.35
40	60	2006	0.08	

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida}$$

$$\dot{m}_a \cdot C_{p_a} \cdot \Delta T_a = \dot{m}_{ac} \cdot C_{p_{ac}} \cdot \Delta T_{ac}$$

$$\dot{m}_{ac} = \frac{\dot{m}_a \cdot C_{p_a} \cdot \Delta T_a}{C_{p_{ac}} \cdot \Delta T_{ac}}$$

Producción frigorífica requerida

$$Q_{t_o} = 3.35 \text{ kW} = 11\,430 \text{ Btu/h} = 0.95 \text{ TR}$$

Factor de seguridad según Norma ASHRAE (Pag 248)

$$Q_t = Q_{t_o} * 1.10\% = 3.685 \text{ kW} = 12\,556.68 \text{ Btu/h} = 1.04 \text{ TR}$$

SELECCIÓN DE UNIDAD COMPRESORA

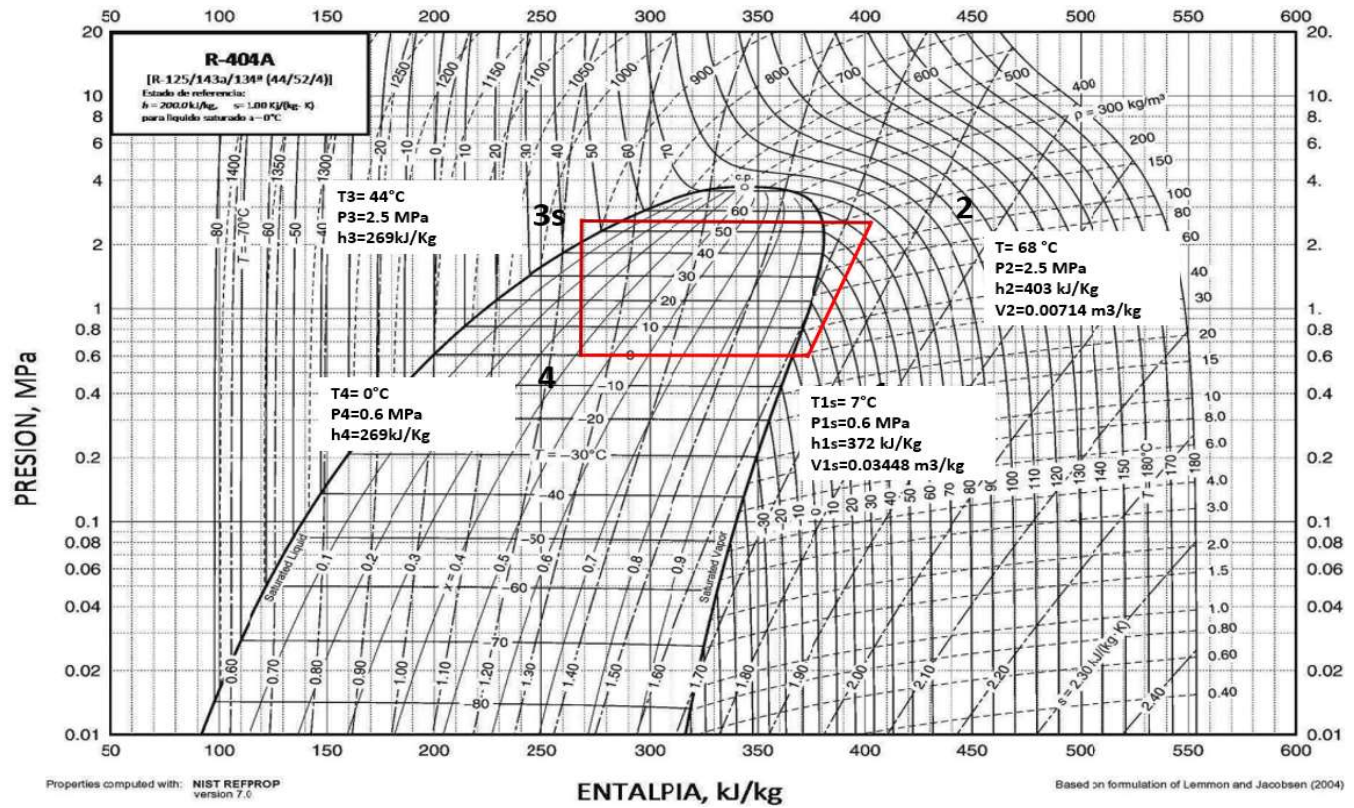
Temperatura de condensación: 55 °C

Temperatura de evaporación: 0 °C

Temperatura de sobrecalentado: 7 °C

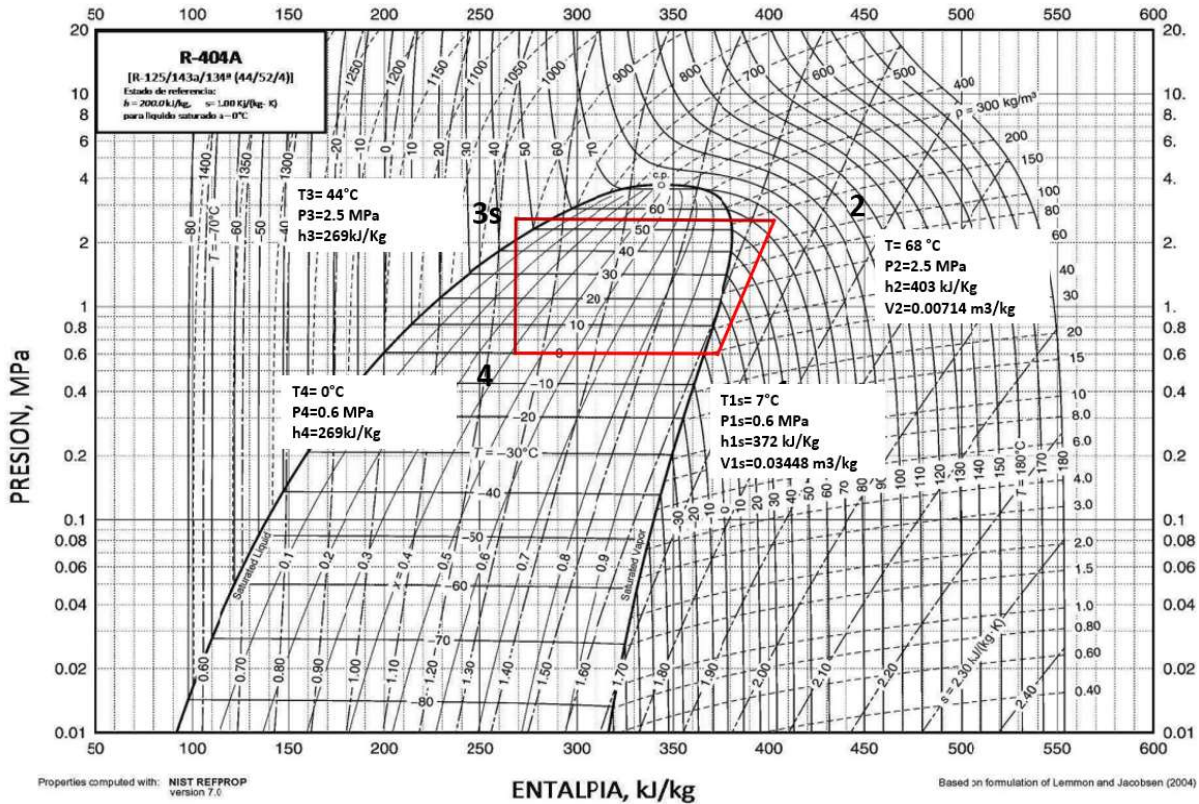
Temperatura de subenfriamiento: 11 °C

Diagrama de Mollier para Refrigerante 404a



SELECCIÓN DE UNIDAD COMPRESORA

Diagrama de Mollier para Refrigerante 404a



Producción frigorífica neta:

$$\dot{Q}_e = h_{1s} - h_4 = 103 \frac{KJ}{Kg}$$

Calor específico del condensador:

$$\dot{Q}_c = h_2 - h_3 = 134 \frac{KJ}{Kg}$$

Trabajo específico del compresor:

$$W_{comp} = \dot{Q}_c - \dot{Q}_e = 31 \frac{KJ}{Kg}$$

SELECCIÓN DE UNIDAD COMPRESORA

Flujo masico de refrigerante

$$m_r = \frac{3.685 \text{ KJ/s}}{103 \text{ KJ/Kg}} = 0.036 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 128.80 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Volumen de refrigerante aspirado

$$V_a = m_r \cdot V_{1s} = 128.80 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 0.03448 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} = 4.44 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Volumen de barrido

$$\eta_V = \frac{V_a}{V_b}$$

$$r_p = \frac{P_K}{P_o} = \frac{2.5}{0.6} = 4.16$$

$$\eta_V = 1 - 0.05(r_p) = 0.79$$

$$V_b = \frac{V_a}{\eta_V} = 5.62 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Potencia del compresor

$$\begin{aligned} P_t &= (h_2 - h_{1s}) \cdot m_R \\ &= 1.109 \text{ kW} \\ &= 1.49 \text{ HP} \end{aligned}$$

SELECCIÓN DE VALVULA DE EXPANSIÓN

Características y modelos de válvulas de expansión electrónicas

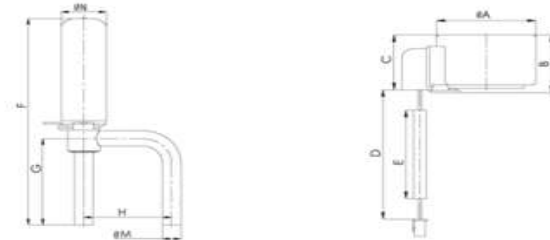
CARACTERÍSTICAS GENERALES

Modelo	Part Number	Asiento ϕ (mm)	Kv (m ³ /h)	Capacidad Nominal Enfriamiento (kW)					MOP Max. Pres. Oper. (MPa)	MOPD Directa (MPa)	MOPD Rev. (MPa)
				R22	R134a	R407C	R404A RS07	R410A			
DPF(T01)1.3C-07	DPF-09001	1,3	0,05	3,5	2,7	3,5	2,5	4,2	4,2	3,43	≥2.1
DPF(T01)1.65C-05	DPF-09002	1,65	0,08	5,3	4,1	5,3	3,7	6,36			
DPF(T01)1.8C-08	DPF-09003	1,8	0,1	7	5,4	7	4,9	8,4			
DPF(T01)2.0C-03	DPF-09004	2	0,16	8,75	6,7	8,75	6,1	10,5			
DPF(T01)2.2C-01	DPF-09005	2,2	0,2	10,5	8,1	10,5	7,4	12,6			
DPF(T01)2.4C-01	DPF-09006	2,4	0,23	17,5	13,5	17,5	12,3	21			
DPF(TS1)3.0C-01	DPF-09007	3	0,39	21	16,2	21	14,7	25,2			≥1.47
DPF(TS1)3.2C-01	DPF-09008	3,2	0,43	28	21,6	28	19,6	33,6			
DPF(S03)4.0C-01	DPF-09010	4	0,5	42	32,3	42	29,4	50,4			
DPF(S03)4.5C-01	DPF-09011	4,5	0,7	52,5	40,4	52,5	36,8	63			≥0.7
DPF(S03)5.5C-01	DPF-09012	5,5	0,9	70	53,9	70	49,0	84			
DPF(S03)6.5C-02	DPF-09013	6,5	1,1	105	80,9	105	73,5	126			

Nota. Adaptado de Sanhua Series DPF-T/S Válvula de Expansión Electrónica (p. 2), por Sanhua, 2012.

Dimensiones de válvulas de expansión electrónicas

DIMENSIONES



Modelo	Bobinas - Series	Dimensiones (mm)					Part No.
		A	B	C	D	E	
DPF(T01)1.3C-07 a DPF(TS1)3.2C-01	PQ-M10012-000001	38,5	26,4	25,6	700	600	DPF-58001
DPF(S03)4.0C-01 a DPF(S03)6.5C-02	PQ-M03012-000001	67,5	42,4	33	700	600	DPF-58002

(*) Condiciones nominales de trabajo: Temperatura de condensación: 38°C; Temperatura de evaporación: 5°C; Subenfriamiento OK; Supercalentam. OK

Modelo Válvula	Serie Bobina	Dimensiones (mm)				
		F	G	H	M	N
DPF(T01)1.3C-07 a DPF(T01)2.4C-01	PQ-M10	78	36	30	6,35	17,3
DPF(TS1)3.0C-01 a DPF(TS1)3.2C-01	PQ-M10	82	40	30	7,94	17,3
DPF(S03)4.0C-01 a DPF(S03)6.5C-02	PQ-M03	148	64,7	63,4	15,88	35,3

Nota. Adaptado de Sanhua Series DPF-T/S Válvula de Expansión Electrónica (p. 3), por Sanhua, 2012.

METODOLOGÍA



PARAMETROS PARA DISEÑO DE EVAPORADOR Y CONDENSADOR

Parámetros del agua y refrigerante para diseño del evaporador

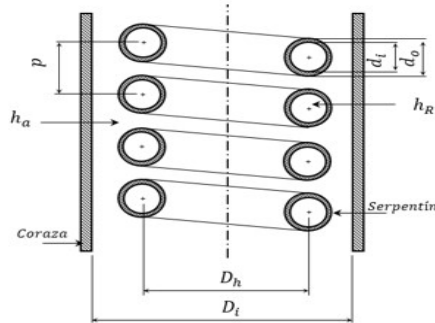
Parámetros	Agua	R404A	Unidad
Flujo másico	0.08	0.036	kg/s
Temperatura de entrada	20	0	°C
Temperatura de salida	10	7	°C

Parámetros para el aceite y refrigerante en el diseño del condensador

Parámetros	Aceite	R404A	Unidad
Flujo másico	0.17	0.036	kg/s
Temperatura de entrada	35	68	°C
Temperatura de salida	45	44	°C

DISEÑO DE EVAPORADOR

Esquema y distribución geométrica del evaporador serpentín coraza



Dimensiones geométricas utilizadas en evaporador

Parámetro	Cantidad	Unidad
Diámetro exterior tubería cobre, d_o	0.0127	m
Diámetro interior tubería cobre, d_i	0.01092	m
Espesor de pared, t_{tubo}	0.000889	m
Diámetro de la hélice, D_h	0.3	m
Pase de la hélice, p	0.019	m
Diámetro interno de la coraza, D_i	0.4	m

Dimensiones de tubería de cobre tipo L para evaporador

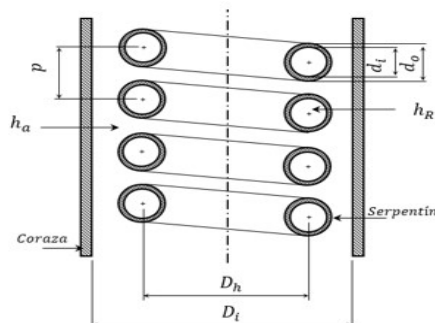
Tubería de cobre de temple rígido Tipo "L"

Medida Nominal	Diámetro Exterior	Diámetro Interior	Espesor de Pared	Peso	Peso por tramo	Presión Máxima	Presión Constante	Flujo
Pulgadas	Pulgadas	Pulgadas	Pulgadas	Lb/pie	libras	PSI	PSI	G. P. M.
milímetros	milímetros	milímetros	milímetros	kg/m	kilogramos	kg/cm ²	kg/cm ²	L. P. M.
1/4"	0.375"	0.315"	0.030"	0.126	2.524	7,200	1,440	
6.35 mm	9.525	8.001	0.762	0.187	1.146	506.16	101.23	
3/8"	0.500"	0.430"	0.035"	0.198	3.965	6,300	1,260	1.873
9.50 mm	12.700	10.922	0.889	0.295	1.800	442.89	88.57	7.089
1/2"	0.625"	0.545"	0.040"	0.285	5.705	5,760	1,152	3.656
12.7 mm	15.875	13.843	1.016	0.424	2.590	404.92	80.98	13.493
3/4"	0.875"	0.785"	0.045"	0.455	9.110	4,632	926	9.600
19 mm	22.225	19.939	1.143	0.678	4.136	325.62	65.09	36.336
1"	1.125"	1.025"	0.050"	0.655	13.114	4,000	800	19.799
25 mm	28.575	26.035	1.270	0.976	5.954	281.20	56.24	74.94
1 1/4"	1.375"	1.265"	0.055"	0.885	17.700	3,600	720	35.048
32 mm	34.925	32.131	1.397	1.317	8.036	253.08	50.61	132.660
1 1/2"	1.625"	1.505"	0.060"	1.143	22.826	3,323	664	56.158
38 mm	41.275	38.227	1.524	1.698	10.363	233.60	46.67	212.560
2"	2.125"	1.985"	0.070"	1.752	35.042	2,965	593	119.099
51 mm	53.975	50.419	1.778	2.608	15.909	208.43	41.68	450.790
2 1/2"	2.625"	2.465"	0.080"	2.483	49.658	2,742	548	214.298
64 mm	66.675	62.611	2.032	3.695	22.545	192.76	38.52	811.120
3"	3.125"	2.945"	0.090"	3.332	66.645	2,592	518	347.397
76 mm	79.375	74.803	2.286	4.962	30.257	182.21	36.41	1,314.90
4"	4.125"	3.905"	0.110"	5.386	107.729	2,400	480	747.627
102 mm	104.775	99.187	2.794	8.017	48.909	168.72	33.74	2,829.77

Nota. Adaptado de Manual Técnico de Cobre (p. 10), por Nacobre S.A.

DISEÑO DE CONDENSADOR

Esquema y distribución geométrica del condensador serpentín coraza



Dimensiones geométricas utilizadas en condensador

Parámetro	Cantidad	Unidad
Diámetro exterior tubería cobre, d_o	0.015878	m
Diámetro interior tubería cobre, d_i	0.01385	m
Espesor de pared, t_{tubo}	0.001016	m
Diámetro de la hélice, D_h	0.4	m
Pase de la hélice, p	0.02	m
Diámetro interno de la coraza, D_i	0.5	m

Dimensiones de tubería de cobre tipo L para condensador

Tubería de cobre de temple rígido Tipo "L"

Medida Nominal	Diámetro Exterior	Diámetro Interior	Espesor de Pared	Peso	Peso por tramo	Presión Máxima	Presión Constante	Flujo
Pulgadas	Pulgadas	Pulgadas	Pulgadas	Lb/pie	libras	PSI	PSI	G. P. M.
milímetros	milímetros	milímetros	milímetros	kg/m	kilogramos	kg/cm ²	kg/cm ²	L. P. M.
1/4"	0.375"	0.315"	0.030"	0.126	2.524	7,200	1,440	
6.35 mm	9.525	8.001	0.762	0.187	1.146	506.16	101.23	
3/8"	0.500"	0.430"	0.035"	0.198	3.965	6,300	1,260	1.873
9.50 mm	12.700	10.922	0.889	0.295	1.800	442.89	88.57	7.089
1/2"	0.625"	0.545"	0.040"	0.285	5.705	5,760	1,152	3.656
12.7 mm	15.875	13.843	1.016	0.424	2.590	404.92	80.98	13.493
3/4"	0.875"	0.785"	0.045"	0.455	9.110	4,632	926	9.600
19 mm	22.225	19.939	1.143	0.678	4.136	325.62	65.09	36.336
1"	1.125"	1.025"	0.050"	0.655	13.114	4,000	800	19.799
25 mm	28.575	26.035	1.270	0.976	5.954	281.20	56.24	74.94
1 1/4"	1.375"	1.265"	0.055"	0.885	17.700	3,600	720	35.048
32 mm	34.925	32.131	1.397	1.317	8.036	253.08	50.61	132.660
1 1/2"	1.625"	1.505"	0.060"	1.143	22.826	3,323	664	56.158
38 mm	41.275	38.227	1.524	1.698	10.363	233.60	46.67	212.560
2"	2.125"	1.985"	0.070"	1.752	35.042	2,965	593	119.099
51 mm	53.975	50.419	1.778	2.608	15.909	208.43	41.68	450.790
2 1/2"	2.625"	2.465"	0.080"	2.483	49.658	2,742	548	214.298
64 mm	66.675	62.611	2.032	3.695	22.545	192.76	38.52	811.120
3"	3.125"	2.945"	0.090"	3.332	66.645	2,592	518	347.397
76 mm	79.375	74.803	2.286	4.962	30.257	182.21	36.41	1,314.90
4"	4.125"	3.905"	0.110"	5.386	107.729	2,400	480	747.627
102 mm	104.775	99.197	2.794	8.017	48.909	168.72	33.74	2,829.77

Nota. Adaptado de Manual Técnico de Cobre (p. 10), por Nacobre S.A.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO DEL EVAPORADOR

Coefficiente de Convección Interno

Temperatura T_s a la superficie del tubo:

$$T_s = \frac{\frac{T_{r4} + T_{r1}}{2} + \frac{T_{a1} + T_{a2}}{2}}{2}$$
$$T_s = \frac{\frac{0 + 7}{2} + \frac{20 + 10}{2}}{2} = 9.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Las propiedades de líquido se toman a la temperatura de película:

$$T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2} = 4.625 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_s > T_{sat}$$

DISEÑO DEL CONDENSADOR

Coefficiente de Convección Interno

Temperatura T_s a la superficie del tubo:

$$T_s = \frac{\frac{T_{r2} + T_{r3}}{2} + \frac{T_{ac1} + T_{ac2}}{2}}{2}$$
$$T_s = \frac{\frac{68 + 44}{2} + \frac{35 + 45}{2}}{2} = 48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Las propiedades de líquido se toman a la temperatura de película:

$$T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2} = 51.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_s < T_{cond}$$

DISEÑO DEL EVAPORADOR

Propiedades termo físicas del refrigerante R 404 A, estado líquido

Propiedades termo físicas	Cantidad	Unidad
Densidad, ρ_{lr}	1140.2	kg/m^3
Calor específico, $C_{p_{lr}}$	1.3994	$kJ/kg\ ^\circ C$
Conductividad térmica, k_{lr}	0.076	$W/m\ K$
Viscosidad dinámica, μ_{lr}	$1.714 * 10^{-4}$	$Pa \cdot s$

Propiedades termo físicas del refrigerante R 404 A, estado de vapor

Propiedades termo físicas	Cantidad	Unidad
Calor latente de vaporización, h_{fg}	165.82	kJ/kg
Densidad de vapor, ρ_{vr}	30.465	kg/m^3

(Anexo I. Norma ASHRAE)

DISEÑO DEL CONDENSADOR

Propiedades termo físicas del refrigerante R 404 A, estado líquido

Propiedades termo físicas	Cantidad	Unidad
Densidad, ρ_{lr}	887.769	kg/m^3
Calor específico, $C_{p_{lr}}$	2.01297	$kJ/kg\ ^\circ C$
Conductividad térmica, k_{lr}	0.056	$W/m\ K$
Viscosidad dinámica, μ_{lr}	$8.377 * 10^{-5}$	$Pa \cdot s$

Propiedades termo físicas del refrigerante R 404 A, estado de vapor

Propiedades termo físicas	Cantidad	Unidad
Calor latente de vaporización, h_{fg}	93.29	kJ/kg
Densidad de vapor, ρ_{vr}	162.68	kg/m^3

(Anexo I. Norma ASHRAE)



DISEÑO DEL EVAPORADOR Y CONDENSADOR

Coefficiente de Convección Interno

Parámetro	Ecuación	Evaporador	Condensador	Unidad
Temperatura en el punto 1 (Sobrecalentamiento)	$T_{pvr} = \frac{T_{r1} + T_{sat}}{2}$	3.5	61.5	°C
Calor específico de vapor	C_{pvR}	1.02792	3.1312	$\frac{kJ}{kg K}$
Velocidad del refrigerante en el interior del tubo	$Q_r = \frac{m_r}{\rho_{lr}}$	3.15×10^{-5}	4.055×10^{-5}	$\frac{m^3}{s}$
	$V_{lr} = \frac{Q_r}{\pi \left(\frac{d_i^2}{4}\right)}$	0.337	0.269	$\frac{m}{s}$
Número de Reynolds	$Re_r = \frac{\rho_{lr} V_{lr} d_i}{\mu_{lr}}$	24 479.26	30 824.595	-
Coefficiente de Convección Interno		1506.95	1 064.157	$\frac{W}{m^2 K}$
$h_i = 0.555 \left(\frac{9.81 \rho_{lr} (\rho_{lr} - \rho_{vr}) (k_{lr})^3}{\mu_{lr} (T_{sat} - T_s) d_i} \left(h_{fg} \cdot 1000 + \frac{3}{8} \cdot C_{ptr} \cdot 1000 \cdot ((T_{sat} - T_s)) \right) \right)^{1/4}$				

Relación descrita por Chaton, considerando que empiezan a generarse las primeras burbujas de vapor o, las primeras gotas de líquido refrigerante.

DISEÑO DEL EVAPORADOR

Coeficiente de Convección Externo

Temperatura promedio del agua:

$$T_{pa} = \frac{T_{a1} + T_{a2}}{2} = \frac{20^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C}}{2} = 15^{\circ}\text{C}$$

Propiedades termo físicas del agua

Propiedades termo físicas	Cantidad	Unidad
Densidad, ρ_a	999.1	kg/m^3
Calor específico, C_{pa}	4 185	$J/kg^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica, k_a	0.589	$W/m K$
Viscosidad dinámica, μ_a	$1.138 * 10^{-3}$	$Pa . s$
Número de Prandtl, Pr_a	8.09	-

Coeficiente de Convección Externo

Temperatura promedio del aceite:

$$T_{pac} = \frac{T_{ac1} + T_{ac2}}{2} = \frac{35^{\circ}\text{C} + 45^{\circ}\text{C}}{2} = 40^{\circ}\text{C}$$

Propiedades termo físicas del aceite

Propiedades termo físicas	Cantidad	Unidad
Densidad, ρ_a	867	kg/m^3
Calor específico, C_{pa}	1 830	$J/kg^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica, k_a	0.109	$W/m K$
Viscosidad dinámica, μ_a	$9.364 * 10^{-3}$	$Pa . s$

DISEÑO DEL EVAPORADOR Y CONDENSADOR

Coefficiente de Convección Externo

Parámetro	Ecuación	Evaporador	Condensador	Unidad
Longitud del serpentín	$L_{serpentín} = N_v \sqrt{\left(2\pi \frac{D_h}{2}\right)^2 + p^2}$	$0.943 N_v$	$1.257 N_v$	m
Volumen anular	$V_{anular} = \frac{\pi}{4} (D_i^2) p N_v$	$0.002 N_v$	$0.004 N_v$	m^3
Volumen ocupado por el serpentín	$V_{serpentín} = \frac{\pi}{4} d_o^2 L_{serpentín}$	$0.0001194 N_v$	$0.0002489 N_v$	m^3

DISEÑO DEL EVAPORADOR Y CONDENSADOR

Coefficiente de Convección Externo

Parámetro	Ecuación	Evaporador	Condensador	Unidad
Volumen disponible para el flujo del fluido en el ánulo	$V_{flujo} = V_{anular} - V_{serpentín}$	0.002 N_v	0.004 N_v	-
Diámetro Equivalente	$D_{eq} = \frac{4 V_{flujo}}{\pi d_o L_{serpentín}}$	0.242	0.233	m
Velocidad de masa	$G_a = \frac{m_a}{\frac{\pi}{4} \left((D_i^2) - (D_{he}^2 - D_{hi}^2) \right)}$	0.704	0.966	$\frac{kg}{m^2 s}$
Número de Reynolds	$R_{ea} = \frac{D_{eq} G_a}{\mu_a}$	149.56	24.02	-
Variación de temperatura (Fluido externo – T superficial)	$\Delta t = T_{a1} - T_{pserpentín}$	10.75	13	°C
Coefficiente de Convección Externo		668.458	122.023	$\frac{W}{m^2 K}$
	$h_o = 116 \left(\left(\frac{k_f^3 \rho_f^2 C_{pf} \beta}{\mu_{f'}} \right) \left(\frac{\Delta t}{d_o} \right) \right)^{0.25}$			

Relación descrita por Chilton, Colburn, Gneraux y Vernons, para convección libre fuera de tubos.

DISEÑO DEL EVAPORADOR Y CONDENSADOR

Coefficiente de Convección Externo

Parámetro	Ecuación	Evaporador	Condensador	Unidad
Coefficiente Global de Transferencia de Calor	$U_e = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_r} + \frac{d_o \ln(r_o/r_i)}{K_{cu}} + \frac{1}{h_a}}$	440.03	107.78	$\frac{W}{m^2 K}$
Diferencia de Temperatura Media Logarítmica	$\Delta T = \frac{(T_{a1} - T_{ro}) - (T_{a2} - T_{ri})}{\ln\left(\frac{T_{a1} - T_{ro}}{T_{a2} - T_{ri}}\right)}$	11.43	14.92	$^{\circ}C$
Área de Transferencia de Calor	$A_o = \frac{Q}{U_e \Delta T}$	0.665	2.082	m^2
Número de espiras	$N_v = \frac{A_o}{\pi d_o \left(\frac{L_{serpentín}}{N_v}\right)}$	17.69	33.20	<i>vueltas</i>
Altura de serpentín	$H_e = N_v p + d_o$	0.35	0.675	m
Longitud de serpentín	$L_e = (1.15)L_{serpentín}$	19.17	47.99	m

RESUMEN: DISEÑO DEL EVAPORADOR Y CONDENSADOR

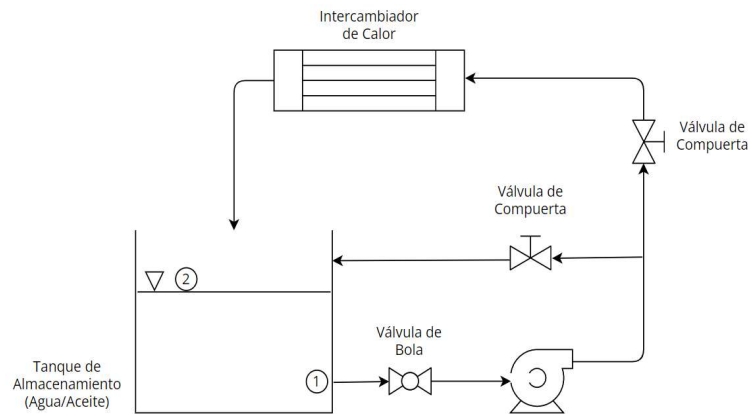
Dimensiones finales de diseño para los serpentines sumergidos en coraza

Parámetro	Evaporador	Condensador	Unidad
Diámetro nominal de la tubería	3/8	1/2	<i>in</i>
Diámetro de la hélice, D_h	0.3	0.4	<i>m</i>
Diámetro interno de la coraza, D_i	0.4	0.5	<i>m</i>
Altura del serpentín	0.35	0.675	<i>m</i>
Número de espiras, N_p	17.69	33.20	<i>Vueltas</i>
Longitud de serpentín	19.17	47.99	<i>m</i>



SELECCIÓN DE BOMBAS

$$h_{bomba} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + h_{turbina} + \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g}$$



Características del sistema de alimentación		Unidad
Material	PVC Alta Temperatura	-
Diámetro de tubería	3/4	in
Rugosidad Equivalente	0.02	mm

Características de los fluidos			Unidad
Fluido	Agua (10°C)	Aceite (55°C)	-
Densidad	999.7	876.0	kg/m ³
Flujo Másico	0.08	0.17	kg/s
Flujo Volumétrico	0.08x 10 ⁻³	0.19 x 10 ⁻³	m ³ /s
Velocidad	0.07	0.17	m/s

Características de los fluidos para cálculo			Unidad
Fluido	Agua (10°C)	Aceite (55°C)	-
Viscosidad Dinámica	1.307x 10 ⁻³	0.2177	centipois
Número de Reynolds	2039.94 (Transición)	26.06 (Laminar)	-
Factor de Darcy	1.9557	2.46	-
Longitud Total Tubería	5.66	5.77	m
Pérdidas menores	11.93		-

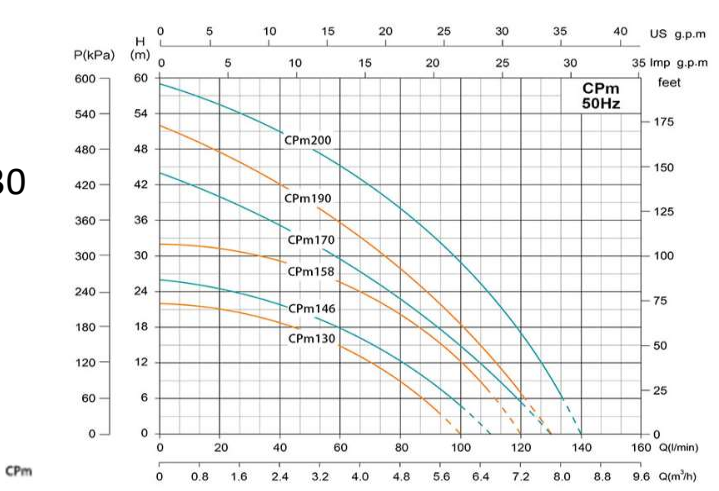
Consideraciones para cálculo			Unidad
Fluido	Agua (10°C)	Aceite (55°C)	-
Presión (P ₂)	101.325		kPa
Presión (P ₁)	$P_1 = P_2 + \rho gh$		kPa
	104.639	107.323	
Velocidad	$V_2 = V_1$		m/s
Altura (z ₂)	0.338	0.698	m
Altura (z ₁)	0		m



SELECCIÓN DE BOMBAS

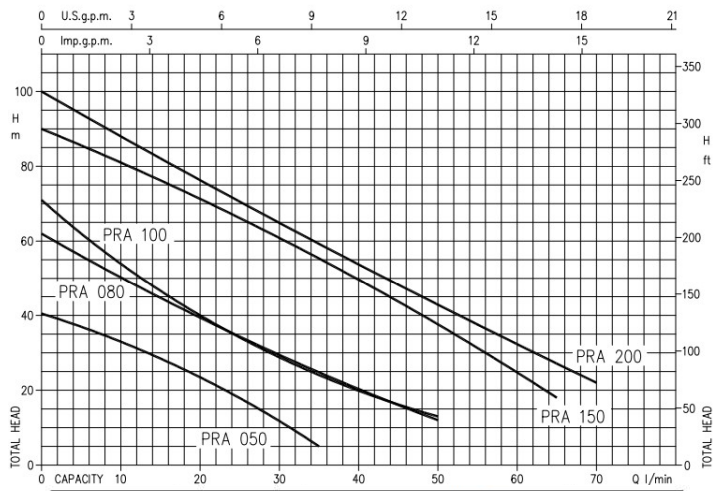
Características de los fluidos			Unidad
Fluido	Agua	Aceite	-
Caudal	0.34	0.84	m ³ /h
Carga	0.148	1.20	mca

SHIMGE CPM 130



Model	Power		Max. Flow (m ³ /h)	Max. Head (m)	Max. Suction (m)
	kW	HP			
Single-Phase					
CPm130	0.37	0.5	6	22	7
CPm146	0.55	0.75	6.6	26	7
CPm158	0.75	1	7.2	32	7
CPm170	1.1	1.5	7.8	44	7
CPm190	1.5	2	7.8	52	7
CPm200	2.2	3	8.4	59	7

EBARA PRA 050 M



Pump Type		Power		Q=Capacity											
		[kW]	[HP]	l/min	0	5	10	15	20	35	50	65	70		
Single phase	Three phase			m ³ /h	0	0.3	0.6	0.9	1.2	2.1	3	3.9	4.2		
PRA 0.50 M	PRA 0.50 T	0.37	0.5	40.5	37	33.3	28.7	23.7	5	-	-	-	-		
PRA 0.80 M	PRA 0.80 T	0.6	0.8	62	56	50.7	45.1	39.8	25	12	-	-	-		
PRA 1.00 M	PRA 1.00 T	0.75	1	71	62	54.4	47	40.4	24.3	13	-	-	-		
PRA 1.50 M	PRA 1.50 T	1.1	1.5	90	-	81	76.9	71.9	55.8	37.9	18	-	-		
PRA 2.00 M	PRA 2.00 T	1.5	2	100	-	88	82.9	77	59.8	43.3	27.4	22	-		

METODOLOGÍA



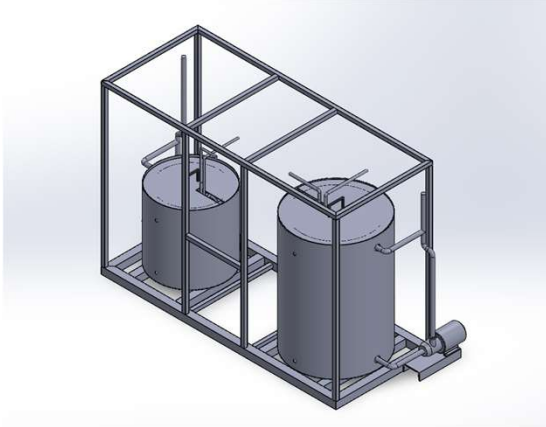
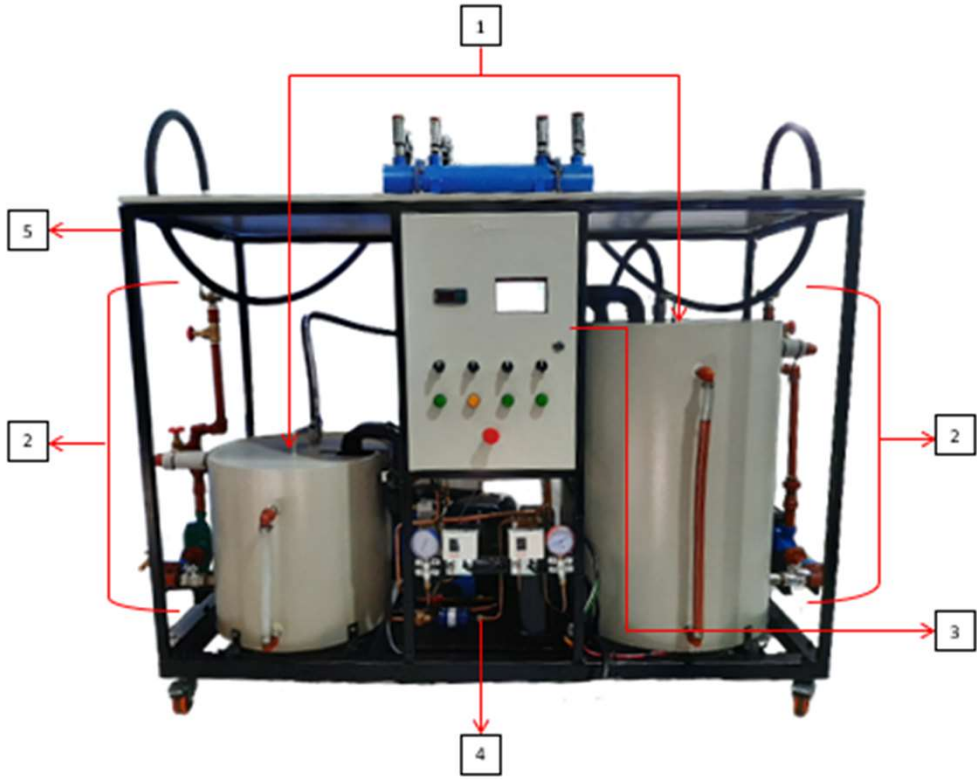
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

EQUIPO BANCO DE PRUEBAS



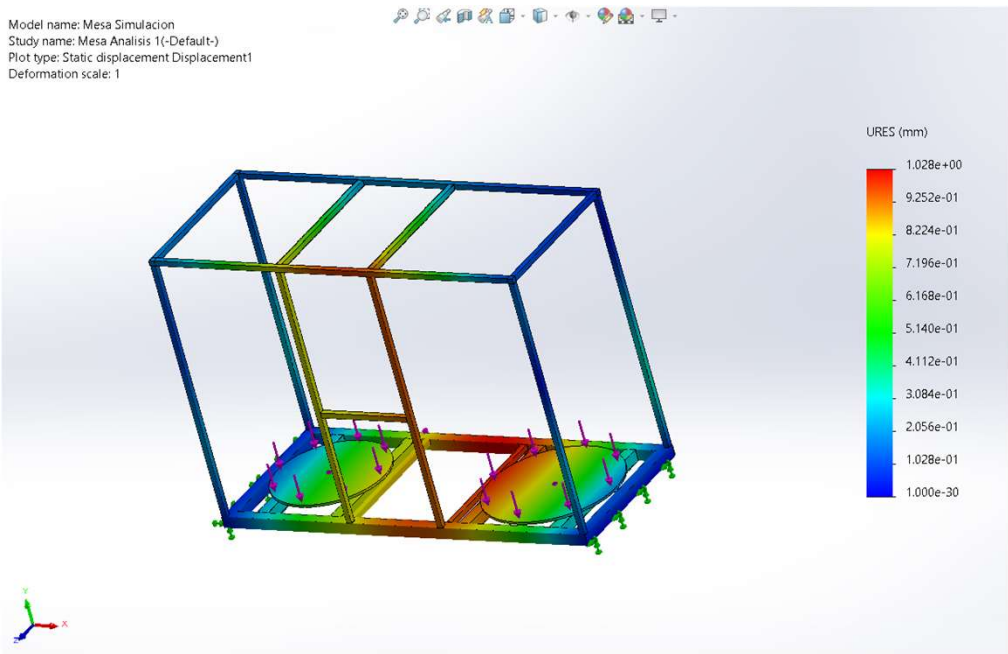
- 1. Tanques de Almacenamiento.
- 2. Sistema de Alimentación.
- 3. Sistema de control y adquisición de datos.
- 4. Sistema de Refrigeración.
- 5. Estructura Metálica.

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS



ESTRUCTURA METÁLICA

Model name: Mesa Simulacion
Study name: Mesa Analisis 1 (-Default-)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1



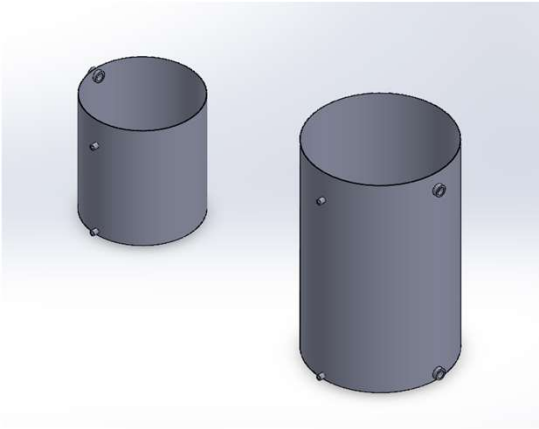
- Perfil Cuadrado 1" espesor 2 mm
- Perfil Cuadrado 3" espesor 3 mm
- Perfil G
- Soldadura MIG

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

TANQUES DE ALMACENAMIENTO (INTERNOS).



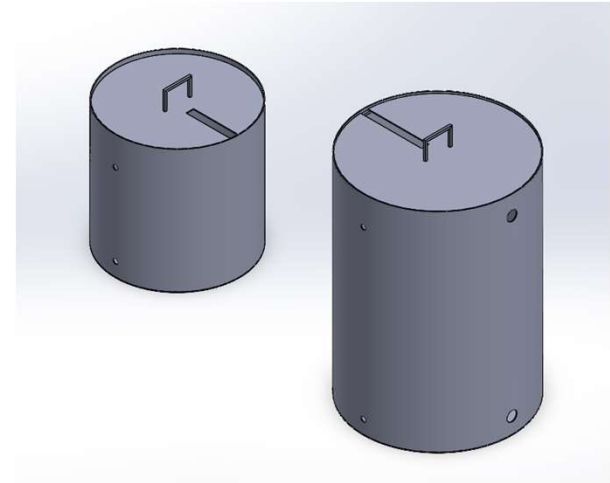
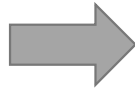
- Acero AISI 430 espesor 3mm
- Niplos de Acero Inoxidable
- Soldadura TIG con aporte 308L
- Gel Decapante



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

TANQUES DE ALMACENAMIENTO (EXTERNOS).



- Acero A36 espesor 3mm
- Soldadura SMAW con E 6010
- Pintura electrostática
- Espuma de poliuretano

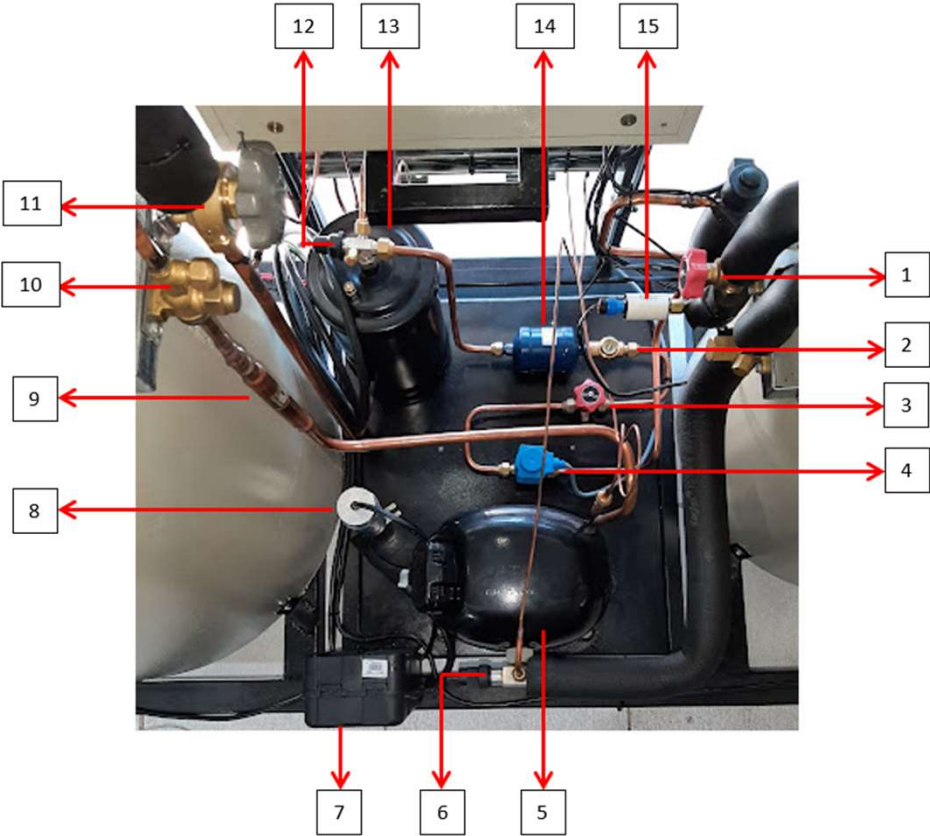
CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

- 1. Llave de cierre manual Evaporador
- 2. Visor de líquido
- 3. Llave de cierre manual
- 4. Válvula solenoide
- 5. Compresor
- 6. Válvula Rotolock
- 7. Kit de arranque
- 8. Capacitor de trabajo
- 9. Válvula antirretorno
- 10. Llave de cierre manual Condensador entrada
- 11. Llave de cierre manual Condensador salida
- 12. Válvula Rotolock del receptor de líquido
- 13. Receptor de líquido
- 14. Filtro deshidratador
- 15. Sensor de temperatura y presión.



SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Compresor



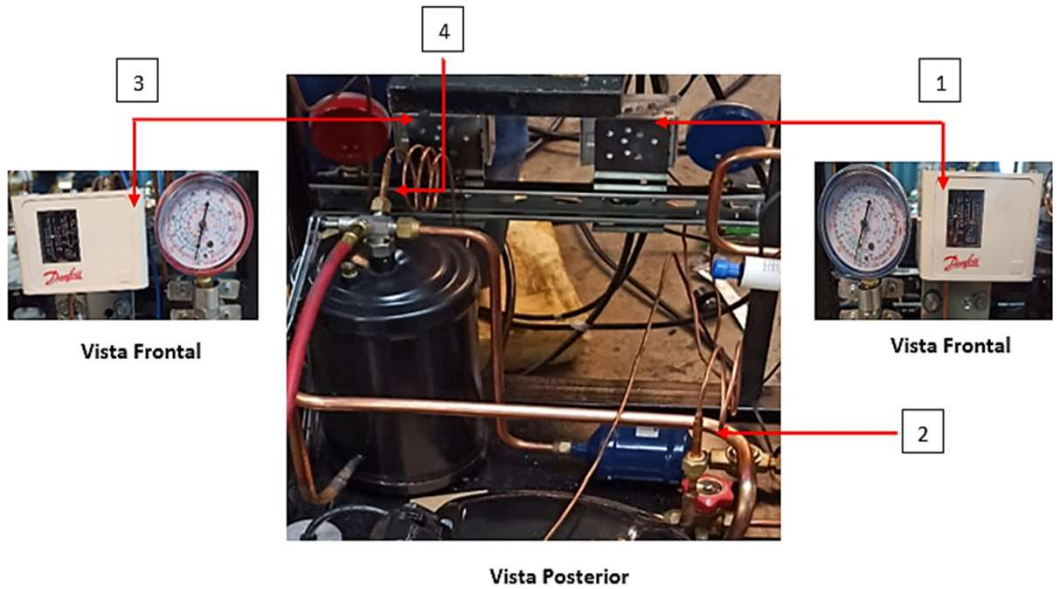
- 1. Compresor
- 2. Kit de Arranque
- 3. Válvula Rotolock



Compresor TECUMSEH CAJ4519Z

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

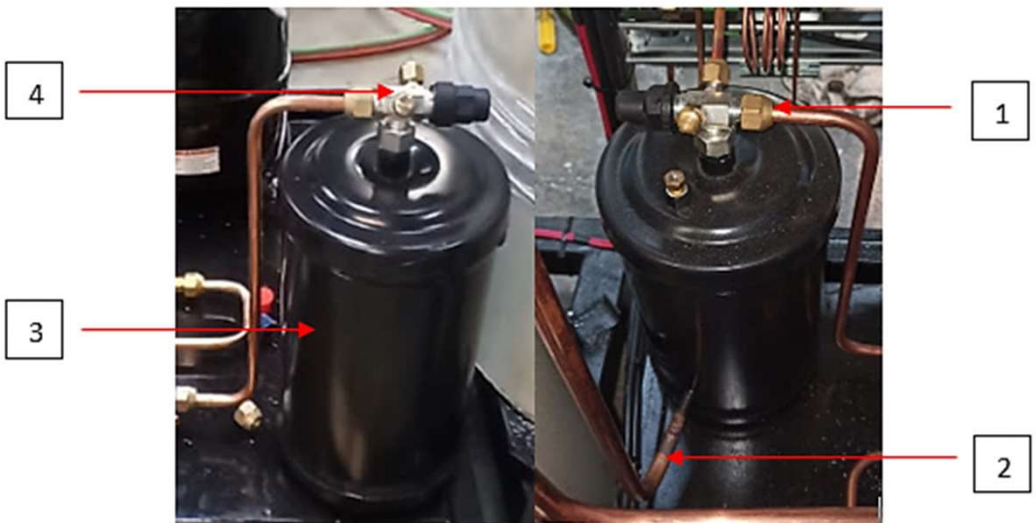
Manómetro de Presión y Presostato de Alta y Baja



- 1. Manómetro y Presostato de baja presión
- 2. Línea de baja presión
- 3. Manómetro y Presostato de alta presión
- 4. Salida del receptor de líquido.

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Recibidor de líquido



- 1. Salida del acumulador
- 2. Entrada del acumulador
- 3. Acumulador de líquido
- 4. Válvula Rotolock

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Filtro Deshidratador y Visor de líquido

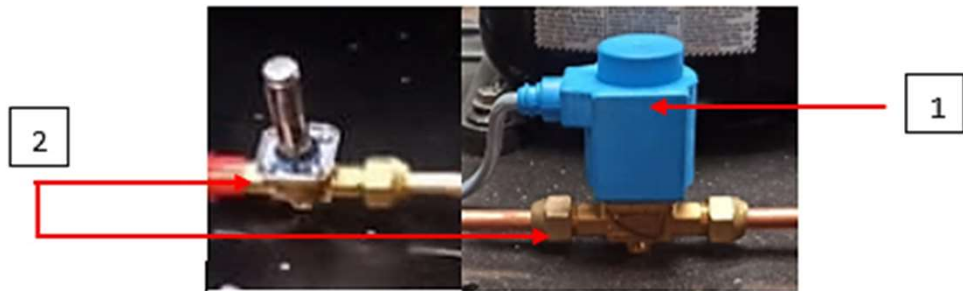


- 1. Filtro deshidratador
- 2. Visor de líquido



SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Válvula Solenoide



- 1. Solenoide
- 2. Válvula



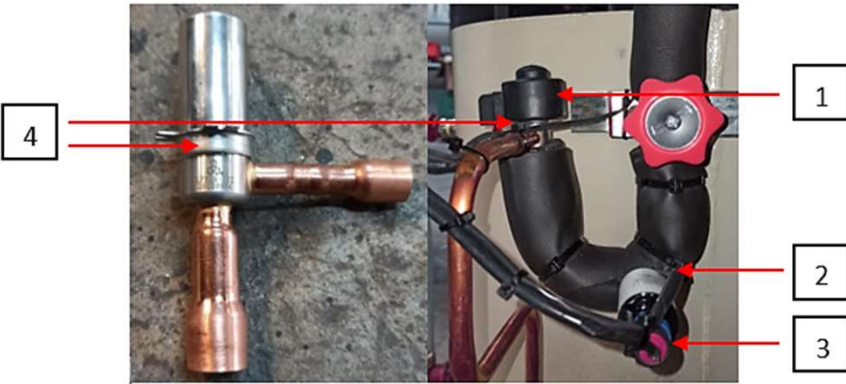
CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Válvula de Expansión Electrónica



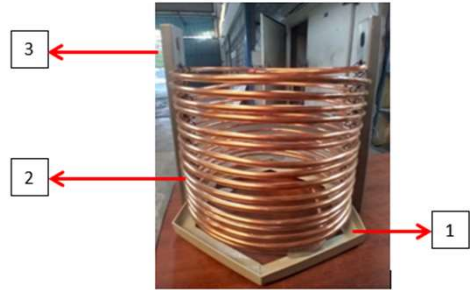
- 1. Bobina
- 2. Sensor de temperatura
- 3. Sensor transductor de presión
- 4. Válvula de expansión



CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

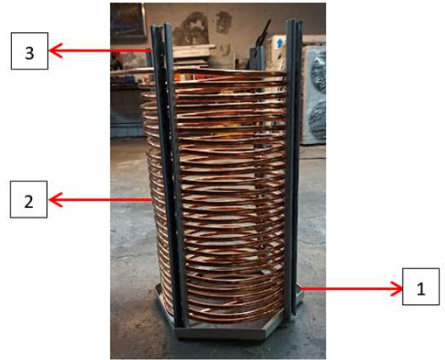
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Serpentín del evaporador



- 1. Base del serpentín
- 2. Serpentín de cobre
- 3. Canal ranurado

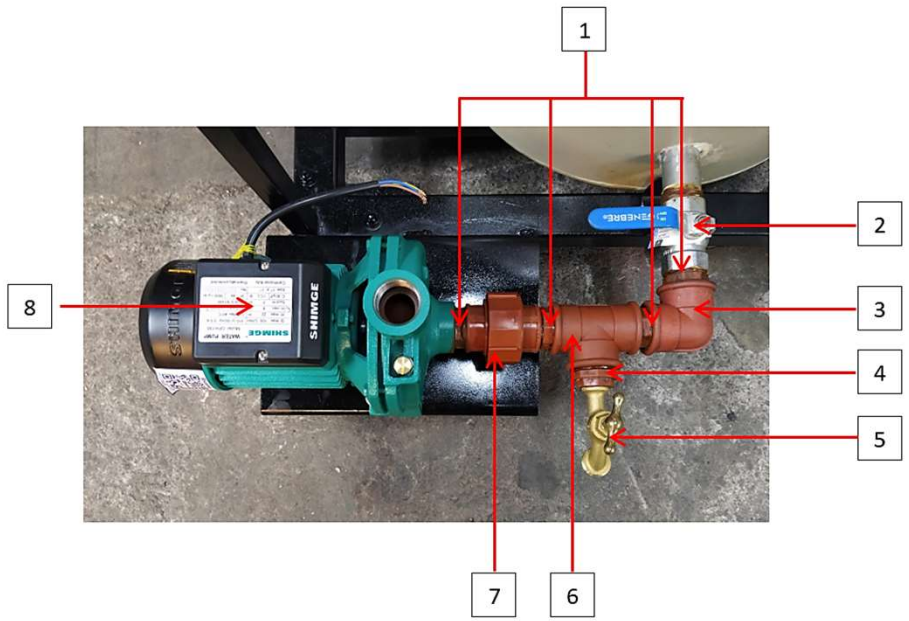
Serpentín del condensador



- 1. Base del serpentín
- 2. Serpentín de cobre
- 3. Canal ranurado

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

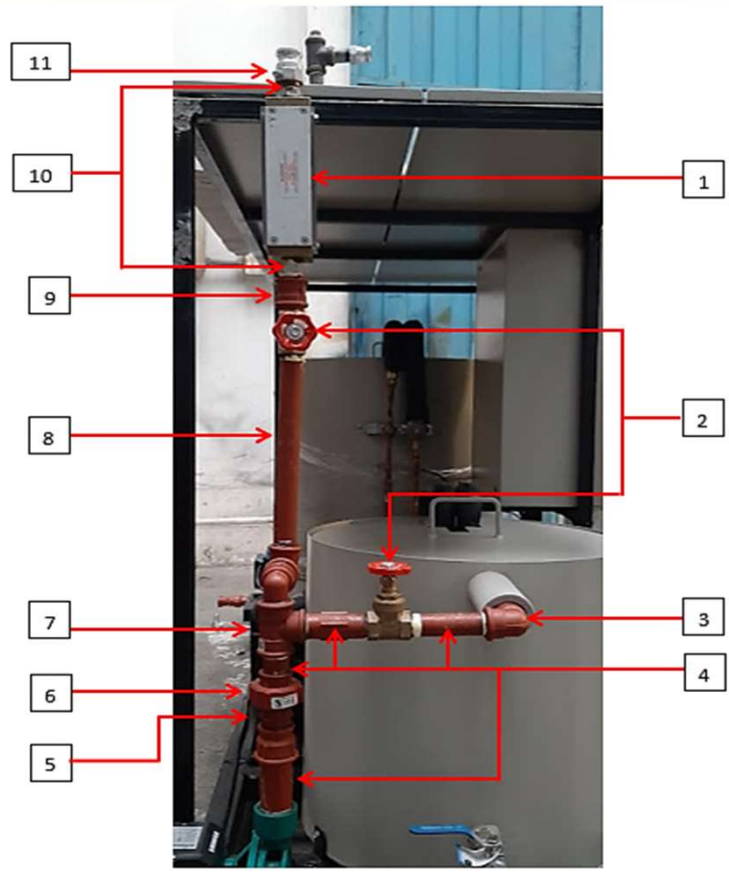


- 1. Neplos
- 2. Llave de paso esférica
- 3. Codo
- 4. Reducción
- 5. Llave de salida
- 6. Conexión T
- 7. Conexión Universal
- 8. Bomba

CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

- 1. Flujómetro
- 2. Llave de paso
- 3. Codo
- 4. Niplos
- 5. Reducción
- 6. Conexión Universal
- 7. Conexión T
- 8. Tubería 3/4"
- 9. Niplo Unión
- 10. Niplos metálicos
- 11. Acople Rápido



CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

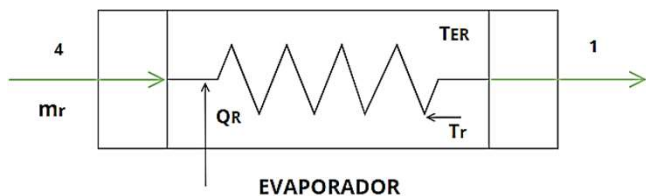
SISTEMA DE CONTROL



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRATEGIA DE CONTROL Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Modelo Dinámico del Evaporador



$$\dot{m}_r h_4 + \dot{Q}_R - \dot{m}_r h_1 = \dot{m}_r C_p \frac{dT_r}{dt}$$

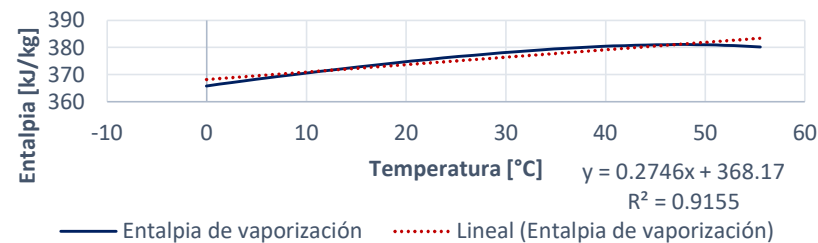
$$\dot{m}_r (h_4 - h_1) + \dot{Q}_R = \rho C_p V \frac{dT_r}{dt}$$

$$\dot{Q}_R = U_e A_e (T_{ER} - T_r)$$

$$U_e = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_r} + \frac{d_o \ln(r_o/r_i)}{k_{cu}} + \frac{1}{h_a}}$$

Regresión de la entalpía de vaporización R404A

Entalpía de vaporización vs Temperatura (Refrigerante R404A)



$$h_{fg} = 368.17 + 0.2746 T_r \text{ [kJ/kg]}$$

$$h_3 = h_4 = h_{4 \text{ liq. sat.}}(T_r) + x(368.17 + 0.2746 T_r)$$

$$h_1(T_r) - h_{4 \text{ liq. sat.}}(T_r) = h_{fg}$$



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRATEGIA DE CONTROL Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Modelo Dinámico del Evaporador

$$\rho C_p V \frac{dT_r}{dt} = U_e A_e (T_{ER} - T_r) + \dot{m}_r (h_{4 liq sat}(T_r) + x(L - GT_r) - h_1(T_r))$$

$$\rho C_p V \frac{dT_r}{dt} = U_e A_e (T_{ER} - T_r) + \dot{m}_r (x - 1)(L - GT_r)$$

Adimensionalización de la ecuación

$$\Theta_e = \frac{T_{ER} - T_r}{\Delta T_c}$$

$$\tau = \frac{t}{t_c}$$

Temperatura característica

$$\Delta T_c = \frac{\dot{m}_r L}{U_e A_e}$$

Tiempo característico

$$t_c = \frac{\rho C_p V}{U_e A_e}$$

$$\gamma = \frac{\Delta T_c}{T_{ER}} = \frac{\dot{m}_r L}{U_e A_e T_{ER}}$$

$$\alpha = \frac{G}{L} T_{ER}$$

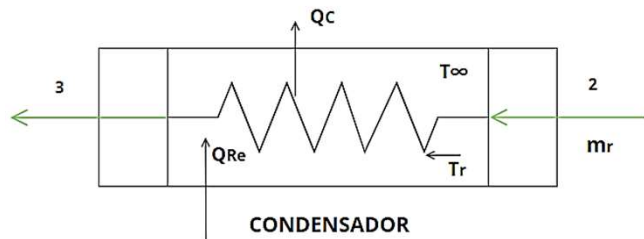
$$\rho C_p V \frac{d(T_{ER} - \Theta_e \Delta T_c)}{d(t_c \tau)} = U_e A_e (\Theta_e \Delta T_c) + \dot{m}_r (x - 1)(L - G(T_{ER} - \Theta_e \Delta T_c))$$

$$-\frac{d\Theta_e}{d\tau} = \Theta_e + (x - 1) \left[1 - \frac{G}{L} T_{ER} \left(1 - \frac{\Delta T_c}{T_{ER}} \Theta_e \right) \right]$$

$$-\frac{d\Theta_e}{d\tau} = \Theta_e + (x - 1)[1 - \alpha(1 - \gamma\Theta_e)]$$

SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRATEGIA DE CONTROL Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Modelo Dinámico del Condensador



$$\dot{Q}_{Re} + \dot{m}_r h_2 + (-\dot{Q}_c) - \dot{m}_r h_3 = \dot{m}_r C_p \frac{dT_c}{dt}$$

$$\dot{Q}_c = U_c * A_c * (T_c - T_\infty)$$

$$U_c = \frac{1}{\frac{d_o}{d_i h_r} + \frac{d_o \ln(r_o/r_i)}{k_{cu}} + \frac{1}{h_{ac}}}$$

Para analizar la energía del refrigerante en la entrada al condensador (punto 2), se supone que tiene un comportamiento de gas ideal.

$$h_2 = h_1 + C_p(T_2 - T_1) \quad \left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad r_p = \frac{P_2}{P_1}$$

$$\dot{Q}_{Re} + \dot{m}_r \left(C_p \left(T_r (r_p)^{\frac{k-1}{k}} - T_r \right) + \left(1 - \frac{G}{L} T_r \right) (1-x)L \right) - U_c A_c (T_c - T_\infty) = \rho C_p V \frac{dT_c}{dt}$$

Adimensionalización de la ecuación

$$\beta = \frac{U_c A_c}{U_e A_e} \quad T_r = T_{ER} (1 - \gamma \theta_e) \quad \lambda = \frac{C_p}{L} T_{ER}$$

$$\frac{P_e}{\Delta T_c (U_e A_e)} + (1 - \gamma \theta_e) \left((r_p)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + (1-x)(1-\alpha(1-\gamma)\theta_e) - \beta \theta_c = \frac{d(\theta_c)}{d(\tau)}$$

SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRATEGIA DE CONTROL Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Función de Transferencia del Sistema

Estados Termodinámicos del ciclo de refrigeración

Estado 1	Estado 2
$T_1 = 7\text{ °C}$	$T_2 = 68\text{ °C}$
$P_1 = 0.6\text{ MPa}$	$P_2 = 2.5\text{ MPa}$
$h_1 = 372\text{ kJ/kg}$	$h_2 = 403\text{ kJ/kg}$
$v_1 = 0.03448\text{ m}^3/\text{kg}$	$v_2 = 0.00714\text{ m}^3/\text{kg}$
Estado 3	Estado 4
$T_3 = 44\text{ °C}$	$T_4 = 0\text{ °C}$
$P_3 = 2.5\text{ MPa}$	$P_4 = 0.6\text{ MPa}$
$h_3 = 269\text{ kJ/kg}$	$h_4 = 269\text{ kJ/kg}$
	$x = 0,417$

Propiedades termofísicas		Temperatura Espacio Refrigerado	
C_p	2.095 kJ/kgK	T_{ER}	10 °C
C_p/C_v	2.032	Constantes Adimensionales	
L	368.17 KJ/kg	γ	2.7342×10^{-4}
G	0.2746 KJ/kg	α	0.211076

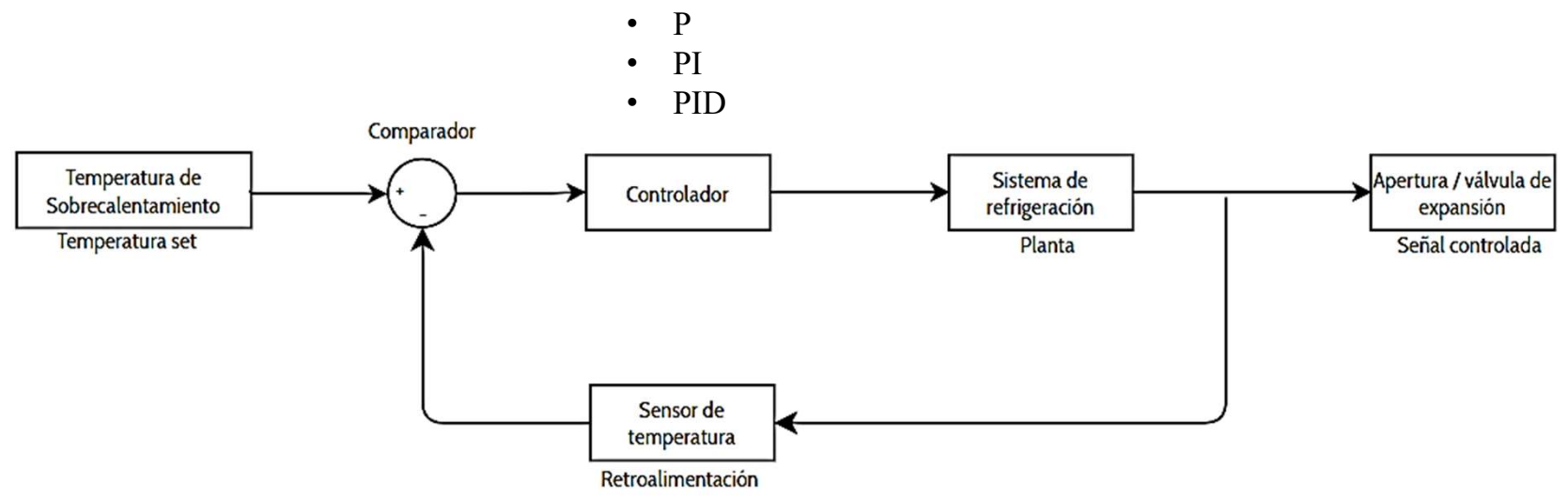
Transformada de Laplace

$$\theta_E(s) = \frac{(x-1)(\alpha-1)}{s^2 + (\alpha\gamma(x-1) + 1)s}$$

$$\theta_E(s) = \frac{0.45994277}{s^2 + 0.99996635s}$$

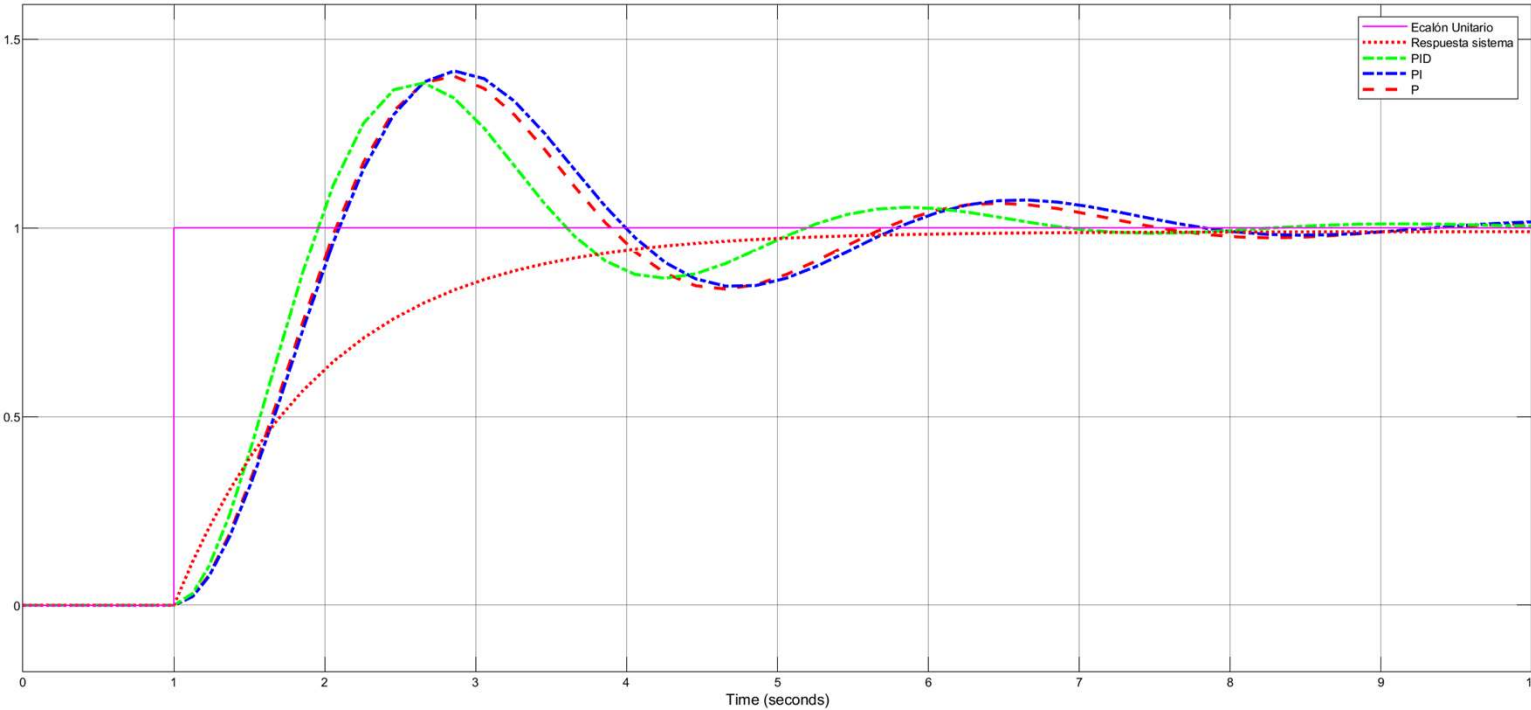
SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRATEGIA DE CONTROL Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Diagrama de Bloques – Control de la Válvula de expansión



SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRATEGIA DE CONTROL Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Respuesta del Sistema a una Entrada Escalón Unitario



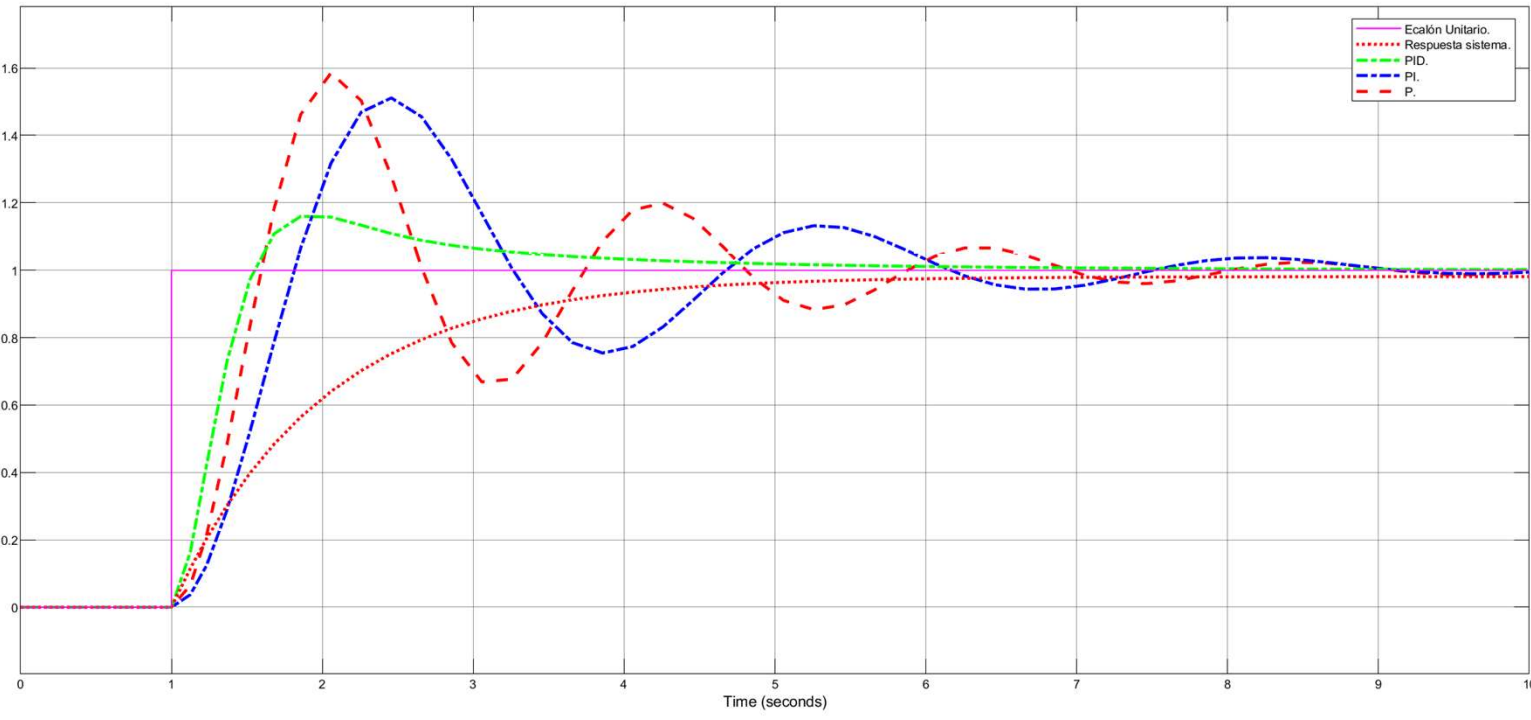
Parámetros de controladores de la primera simulación

Controlador	K_p	K_i	k_d
P	7.03056	—	—
PI	6.72030	0.19080	—
PID	7.76480	0.12648	0.84188



SELECCIÓN DE LA MEJOR ESTRATEGIA DE CONTROL Y MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Respuesta del Sistema a una Entrada Escalón Unitario

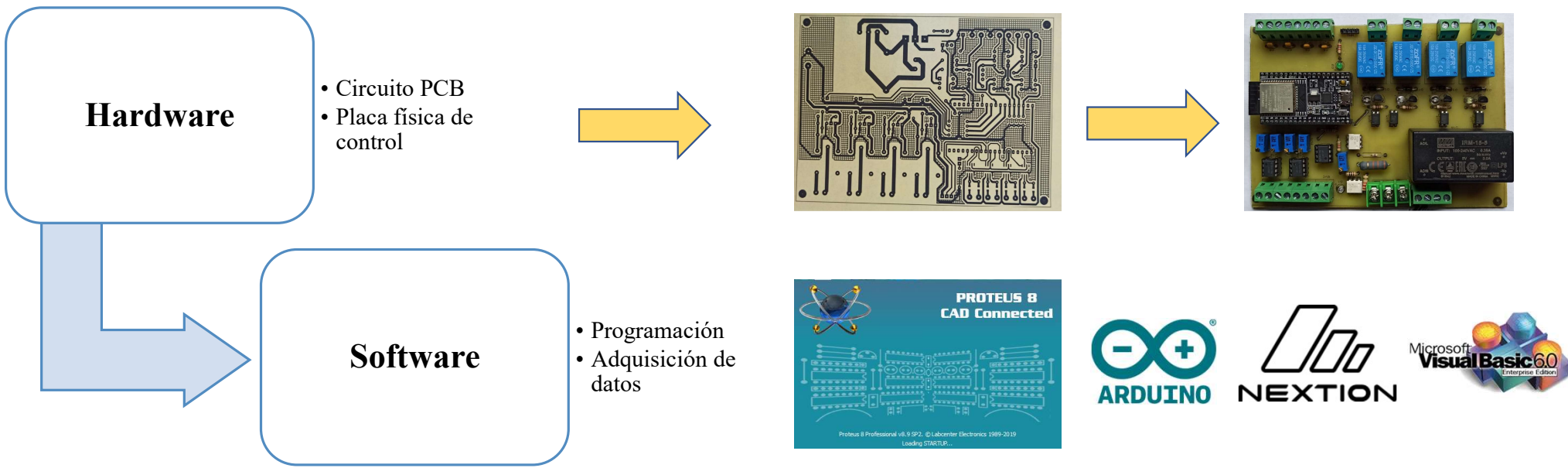


Parámetros de controladores de la segunda simulación

Controlador	K_p	K_i	k_d
P	19.25786	—	—
PI	10.97473	0.41076	—
PID	11.47971	3.78228	6.0003



COMPLEMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

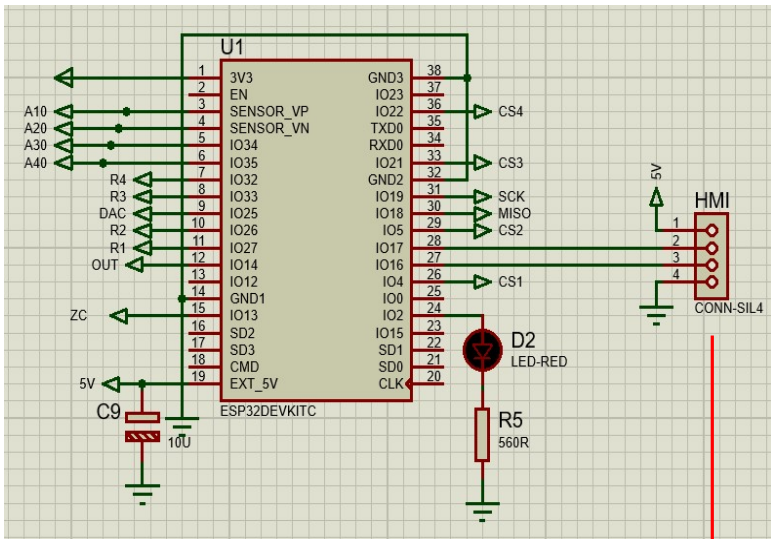


ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE CONTROL

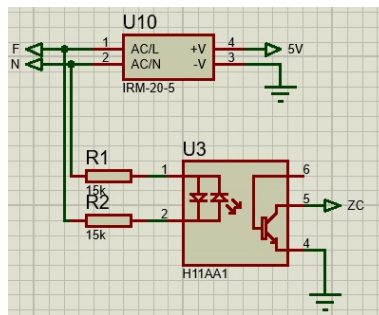
Diseño de los Componentes en Proteus

Microcontrolador ESP32

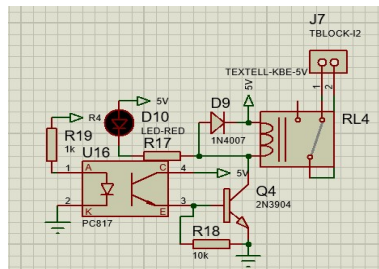


Adquisición de datos

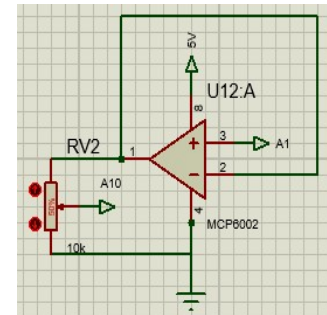
Fuente IRM



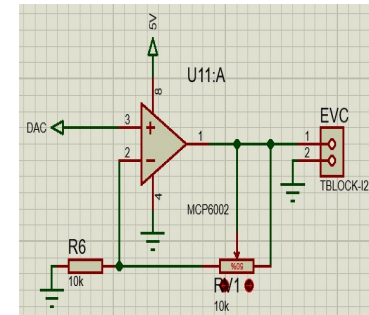
Relés de accionamiento VS-C-B1-B2



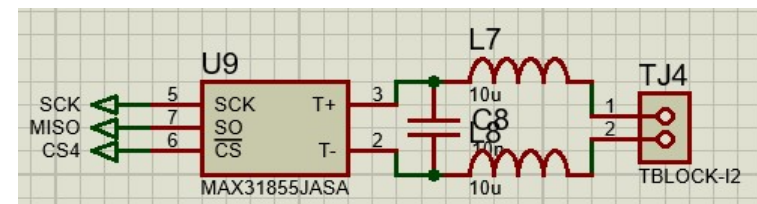
Operacionales



DAC



Bloque de lectura de temperaturas



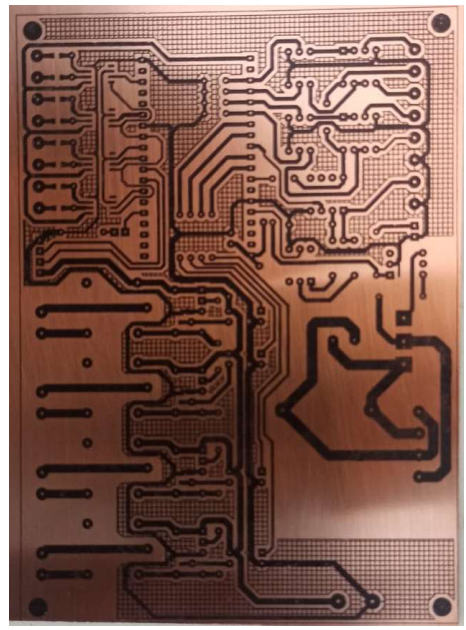
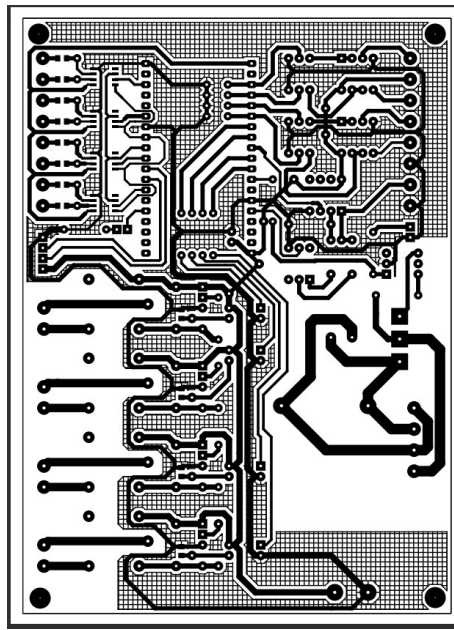
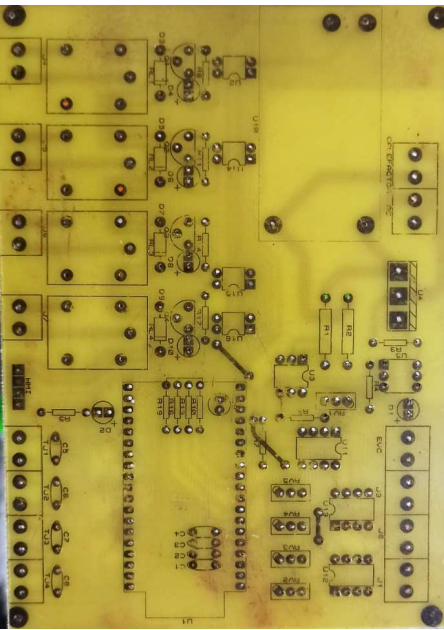
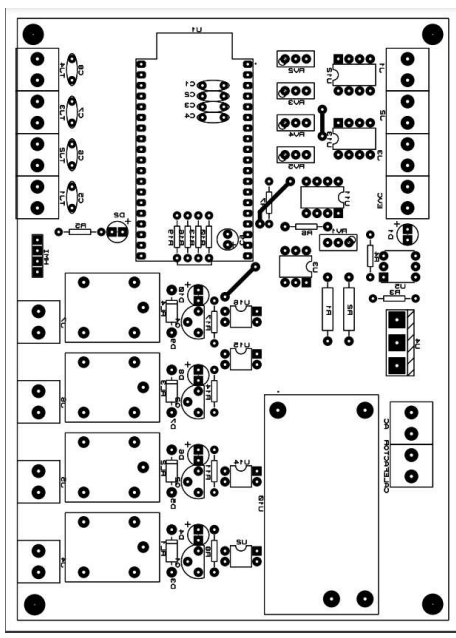
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PLACA PCB

Impresión y planchado del Circuito PCB



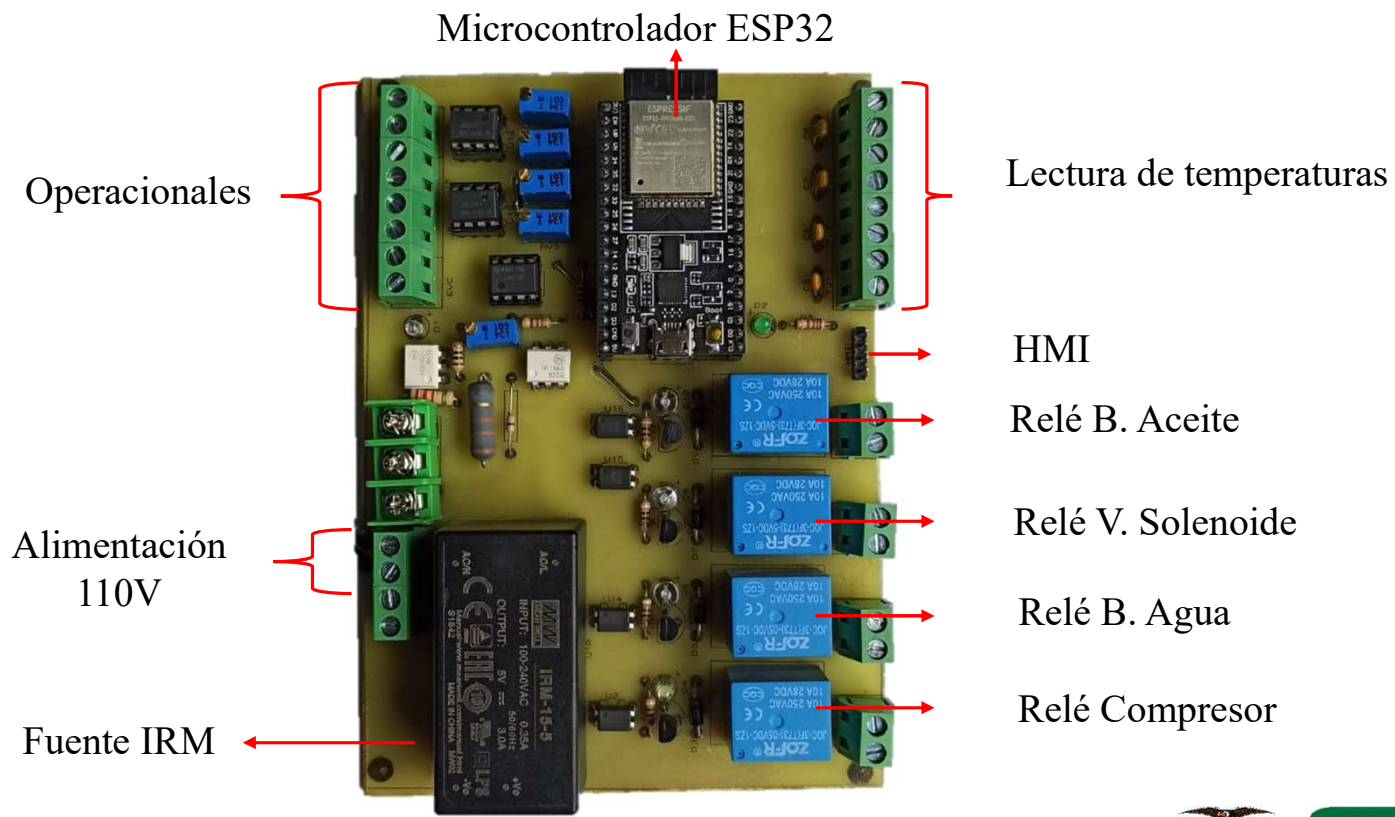
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

COMPONENTES ELÉCTRONICOS DE SISTEMA DE CONTROL

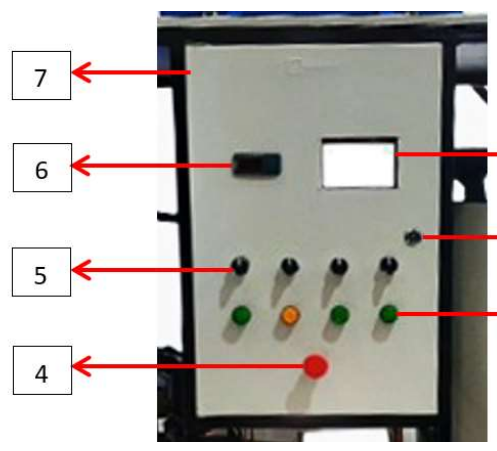
Componentes Físicos de la Placa de control



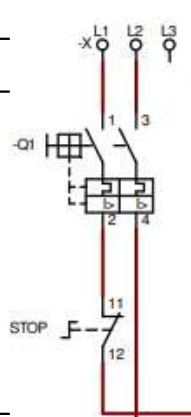
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

CIRCUITO DE CONTROL

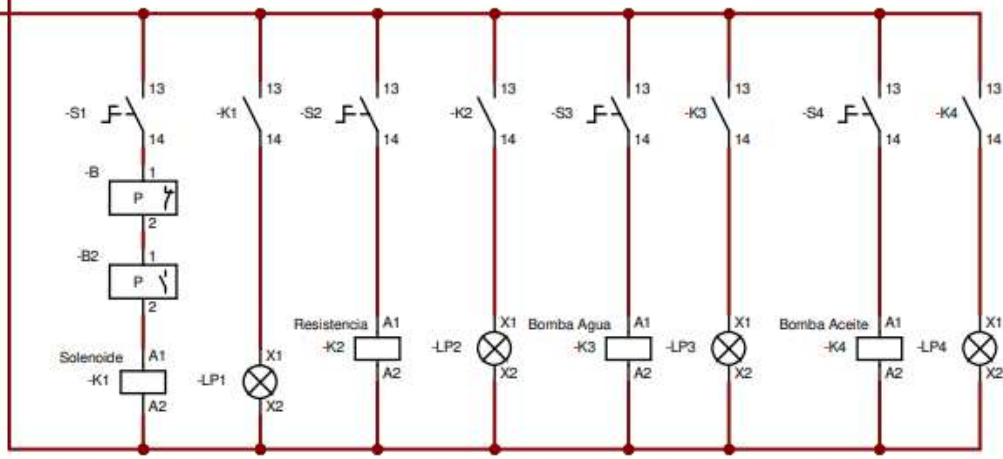
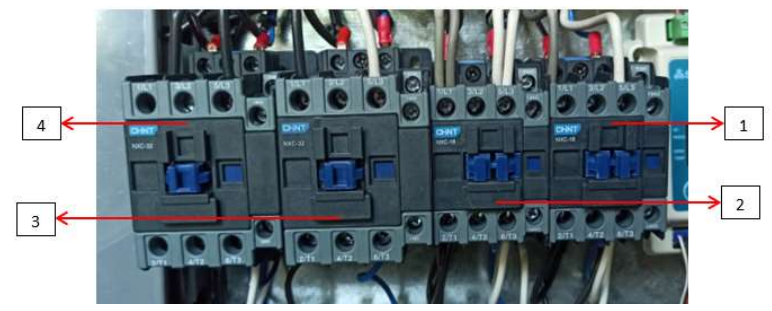
Elemento	Función
Selector 2 posiciones	Posición para iniciar el funcionamiento de los actuadores
Contactor	Dispositivo electromagnético de enclavamiento
Luz piloto	Indicador de funcionamiento del sistema
Paro de emergencia	Suspende o produce el paro del sistema en caso de presentarse problemas



- 1. HMI
- 2. Cerradura
- 3. Luz Piloto
- 4. Paro de Emergencia
- 5. Selector
- 6. C.T
- 7. Gabinete metálico

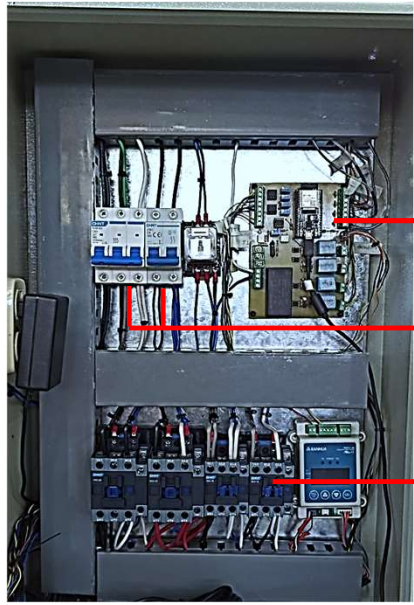


FUENTE 220V - AC

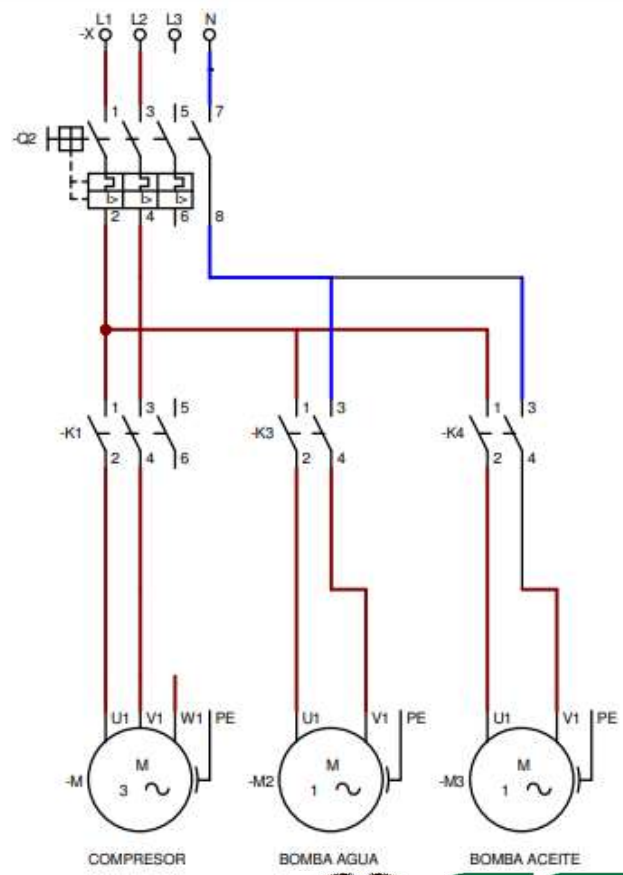


CIRCUITO DE POTENCIA

Elemento	Función
Disyuntor	Dispositivo de protección en condiciones indeseadas de tensiones excesivas
Contactador	Dispositivo electromagnético de enclavamiento



- 1. Placa de control
- 2. Disyuntores
- 3. Contactores



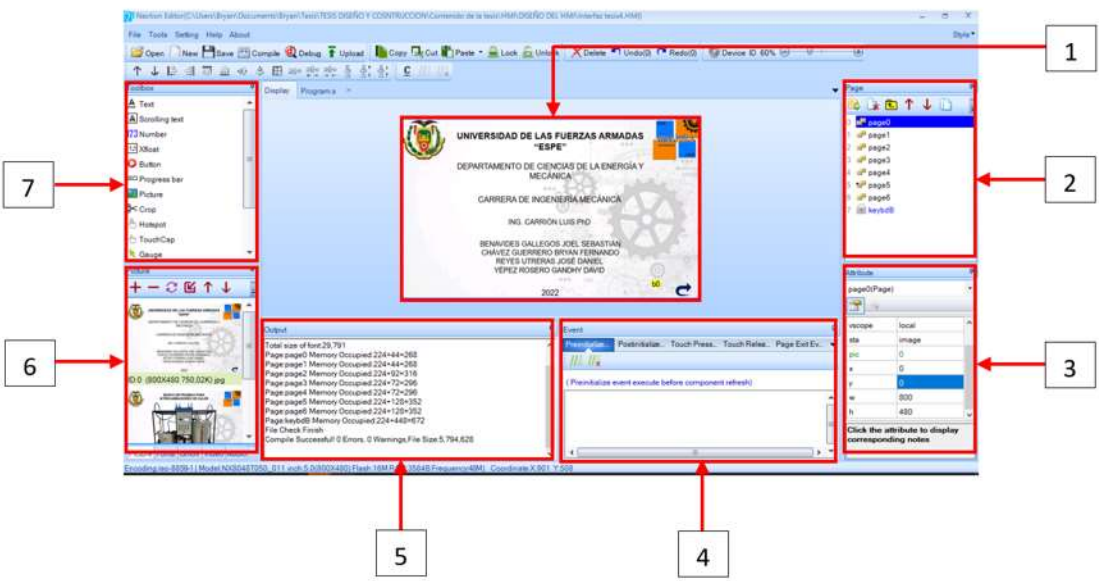
CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

SOFTWARE



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO DEL HMI



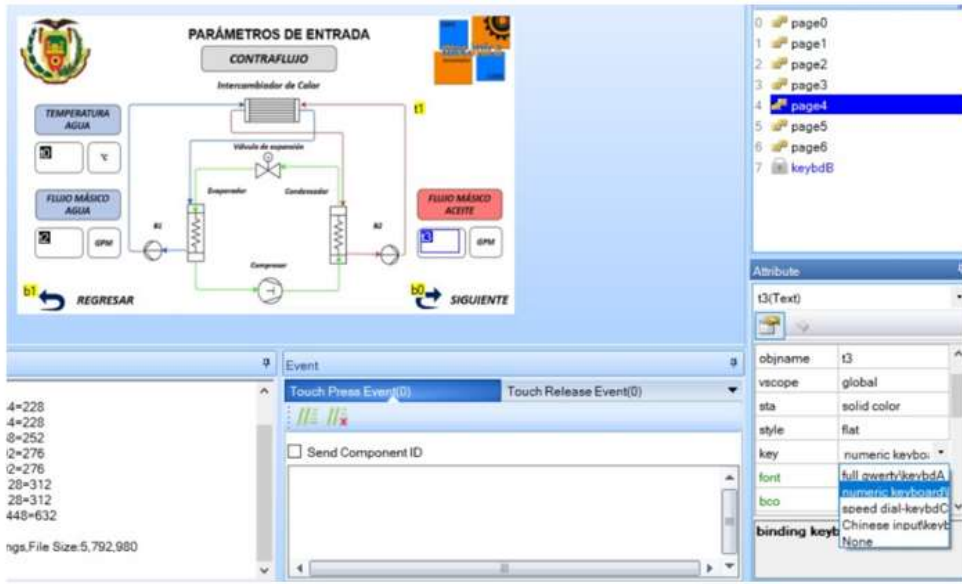
1. Página en diseño
2. Bloque de páginas
3. Bloque de atributos
4. Bloque de programación
5. Bloque de compilación
6. Bloque de carga de páginas
7. Bloque de herramientas de diseño.

SOFTWARE

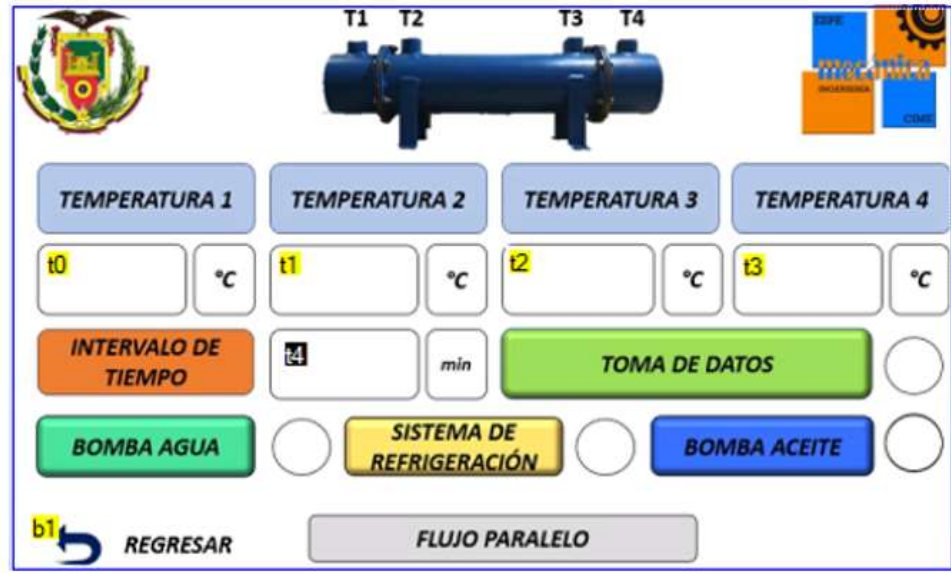


DISEÑO DEL HMI

Dirección para diferentes tipos de entradas



Programación de botones de actuadores y salida de texto en HMI



INTERFÁZ MÁQUINA HOMBRE HMI



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
"ESPE"**

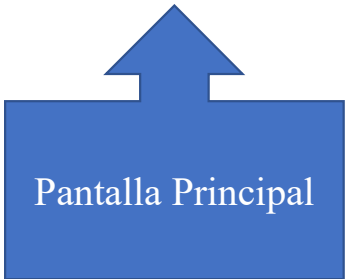
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ING. CARRIÓN LUIS PhD

BENAVIDES GALLEGOS JOEL SEBASTIÁN
CHÁVEZ GUERRERO BRYAN FERNANDO
REYES UTRERAS JOSÉ DANIEL
YÉPEZ ROSERO GANDHY DAVID


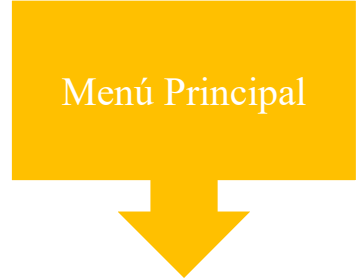
2022



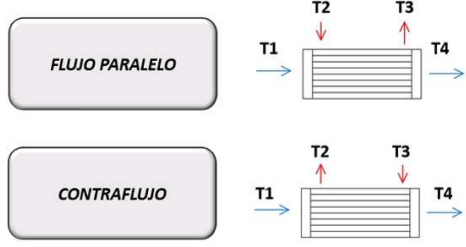
**BANCO DE PRUEBAS PARA
INTERCAMBIADORES DE CALOR**



SIGUIENTE




**DISPOSICIÓN DE FLUJO EN
INTERCAMBIADOR DE CALOR**



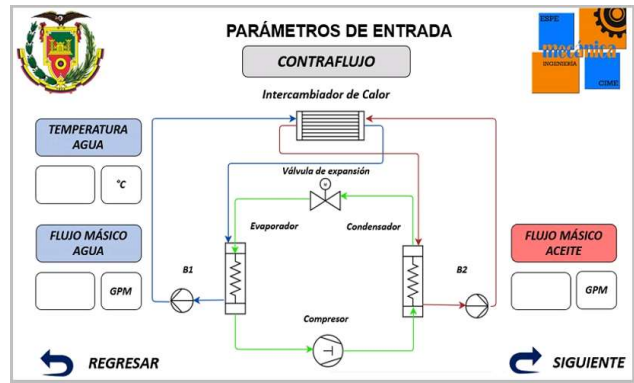
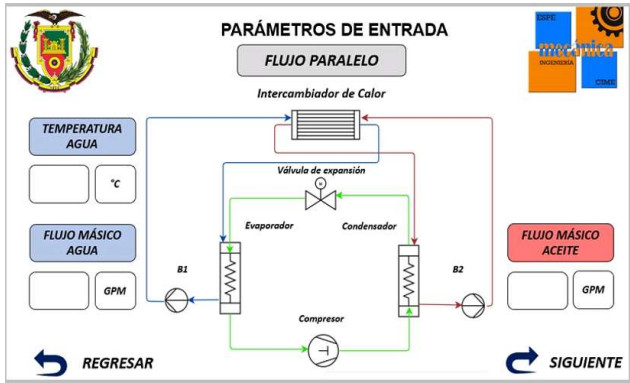
FLUJO PARALELO

CONTRAFLUJO

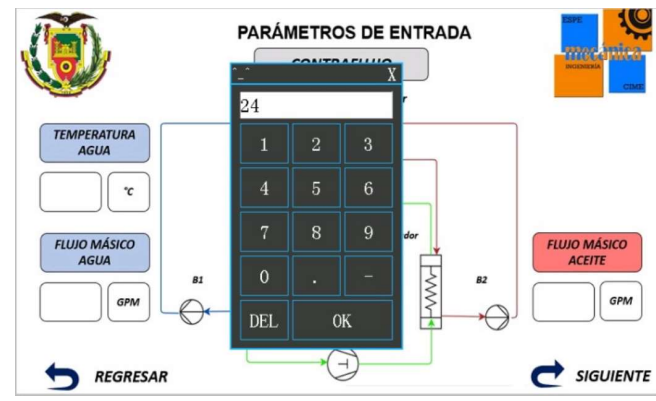


INTERFÁZ MÁQUINA HOMBRE HMI

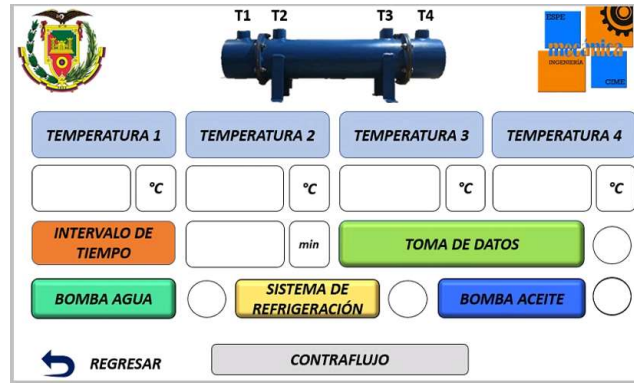
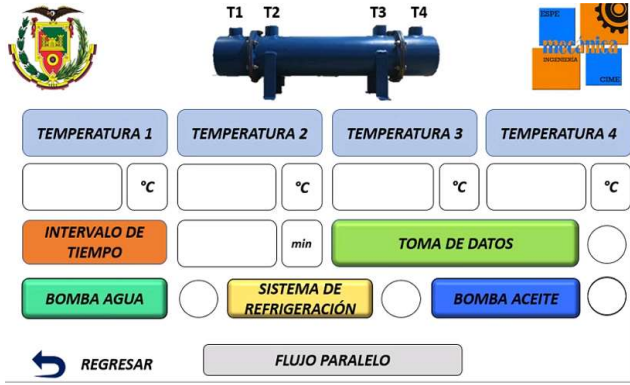
Parámetros de entrada



Ingreso de Parámetros



Salida de datos y Control de Elementos



ADQUISICIÓN DE DATOS

Proyecto1 - Form1 (Form)

Archivo Inicio Insertar Dibujar Disposición de página Fórmulas Datos Revisar Vista Ayuda ¿Qué desea hacer?

Calibri 11 A A

Formato condicional Insertar Suma

Formato de tabla Dar formato como tabla Eliminar

Estilos de celdas Formato Formato

Participación Fuente Alineación Número Edición Celdas Edición

K14

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

Hoja1

100%

Tabla de datos: PRÁCTICA BANCO DE PRUEBAS PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR

FECHA	AGUA			ACEITE			DISPOSICIÓN DE FLUJO
	TEMPERATURAS	FLUJO MASICO	TEMPERATURAS	FLUJO MASICO			
	T1 °C	T4 °C	T2 °C	T3 °C			
2022-07-28	19.5	20	2	42.25	38.25	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.25	20.25	2	42.5	38	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.75	20.25	2	42.75	38.75	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.25	20	2	43.25	40	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.5	20	2	43.5	39.5	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.75	20.25	2	44	40.25	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.25	20.25	2	44.25	40	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.5	20	2	44.75	41	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.25	20	2	45.25	41.25	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.25	19.75	2	45.25	41.5	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	19.5	19.75	2	45.5	42	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	20.25	20.75	2	45.75	42.5	0.8	CONTRAFUJO
2022-07-28	20.5	20.25	2	46	42.5	0.8	CONTRAFUJO

SOFTWARE



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PUESTA A PUNTO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

*Presurización y
revisión de fugas*



Vacío del Sistema



Carga de Refrigerante

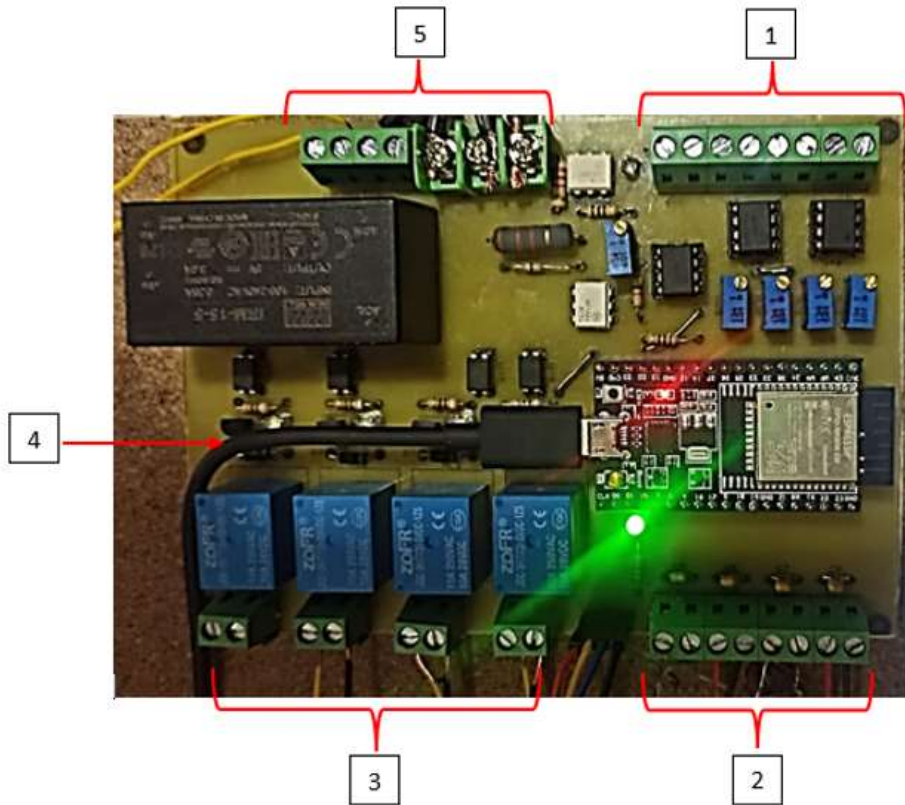


PUESTA A PUNTO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PUESTA A PUNTO DEL SISTEMA DE CONTROL



1. Conexión sensores de control PID.
2. Conexión de termocuplas.
3. Conexión a relés del sistema de bombeo y refrigeración.
4. Cable serial.
5. Conexión Control de niquelina y fuente de corriente.

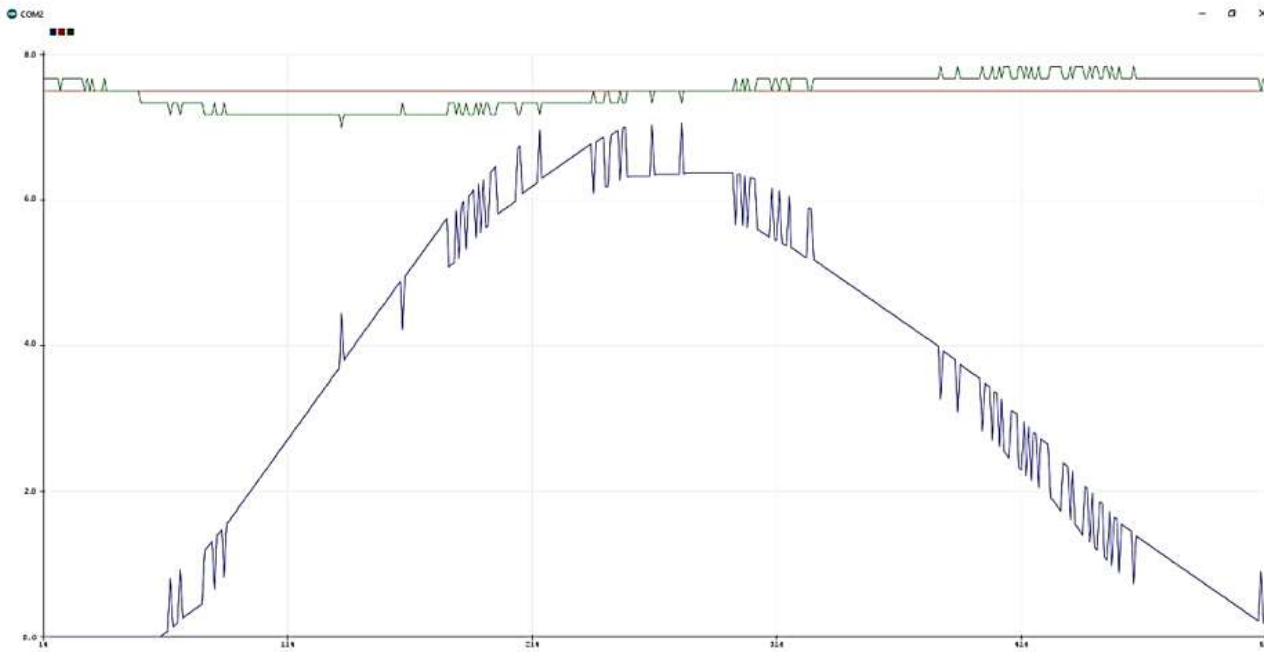
PUESTA A PUNTO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CONTROL PID EN LA VÁLVULA DE EXPANSIÓN

- Constante Proporcional: 11.47971
- Constante Integral: 3.7828
- Constante Derivativa: 6.0003



Temperatura de sobrecalentamiento 7°C

Presión de refrigerante (bar)	Apertura de la válvula (%)
5,9	35.7
6,1	29.1
6,2	28
6,3	27.7
6,4	27.5
6,7	26.8
6,9	26.6
7,2	26.5
7,5	24.8

PUESTA A PUNTO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

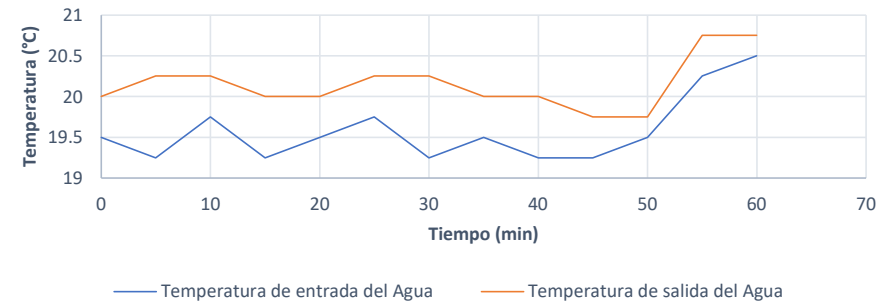


PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

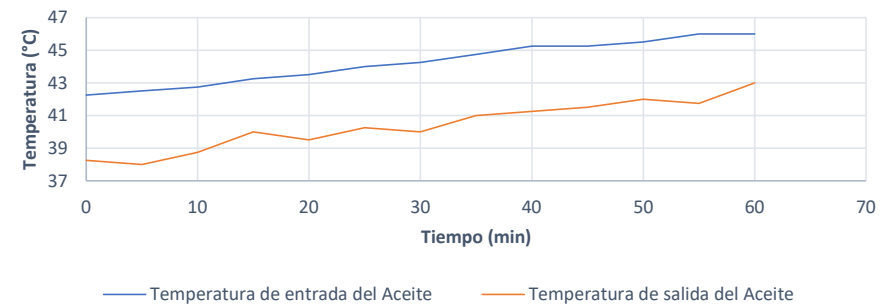
Datos en flujo paralelo, Temperatura de ingreso en HMI a 19.5 °C

ORD	Temperatura (°C)				Caudal (GPM)		Tiempo (min)
	T _{ci}	T _{ho}	T _{hi}	T _{co}	m _h	m _c	
1	19.50	38.25	42.25	20.00			0
2	19.25	38.00	42.50	20.25			5
3	19.75	38.75	42.75	20.25			10
4	19.25	40.00	43.25	20.00			15
5	19.50	39.50	43.50	20.00			20
6	19.75	40.25	44.00	20.25			25
7	19.25	40.00	44.25	20.25	0.8	2	30
8	19.50	41.00	44.75	20.00			35
9	19.25	41.25	45.25	20.00			40
10	19.25	41.50	45.25	19.75			45
11	19.50	42.00	45.50	19.75			50
12	20.25	42.50	45.75	20.75			55
13	20.50	42.50	46.00	20.25			60

Temperatura de entrada y salida del Agua vs. Tiempo



Temperatura de entrada y salida del Aceite vs. Tiempo

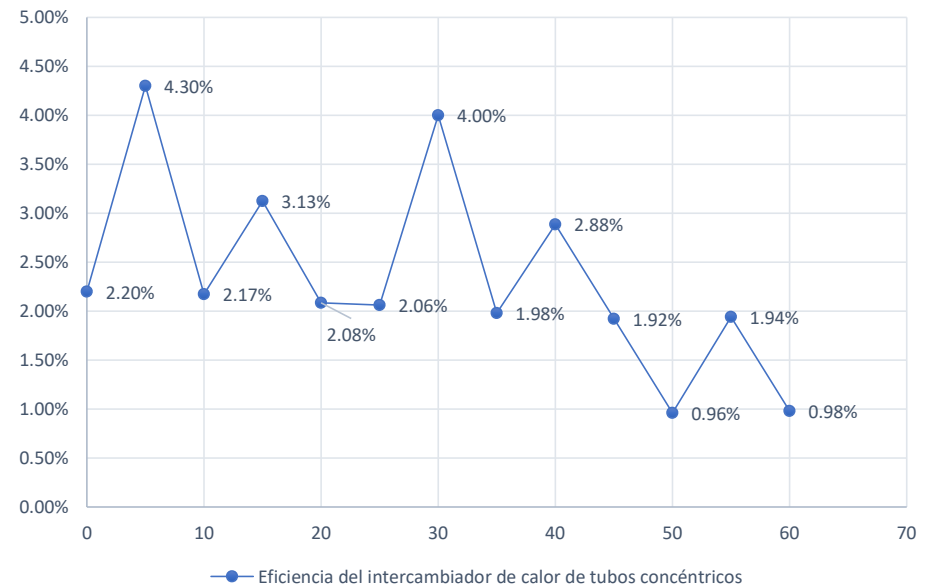


EFICIENCIA DEL EQUIPO

Eficiencia del Intercambiador de Calor en contraflujo

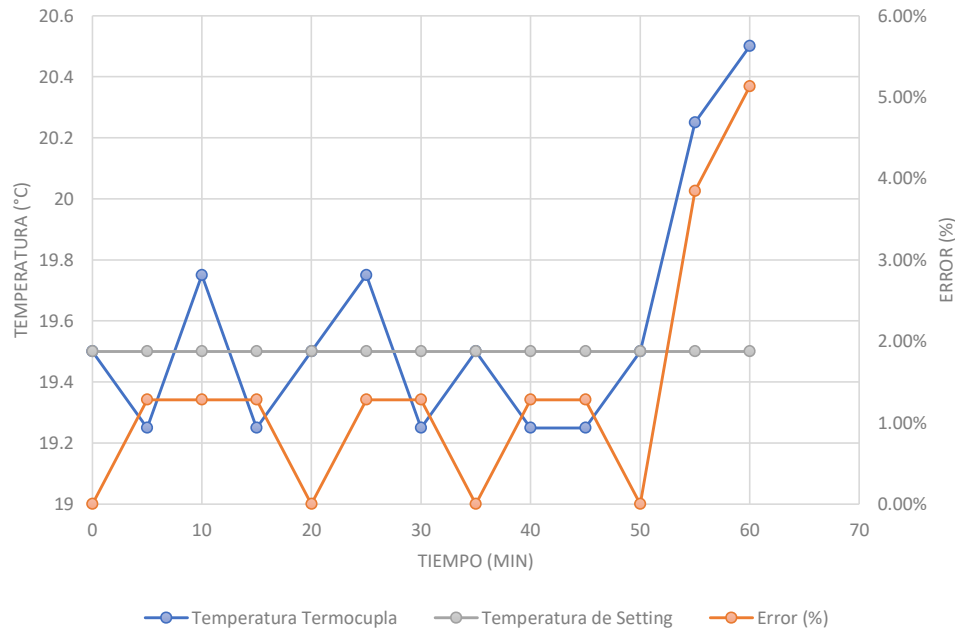
ORD	Potencia Máxima Q_{\max} (W)	Calor cedido Q_c (W)	Eficiencia (%)
1	76167.00	1674.00	2.20%
2	77841.00	3348.00	4.30%
3	77004.00	1674.00	2.17%
4	80352.00	2511.00	3.13%
5	80352.00	1674.00	2.08%
6	81189.00	1674.00	2.06%
7	83700.00	3348.00	4.00%
8	84537.00	1674.00	1.98%
9	87048.00	2511.00	2.88%
10	87048.00	1674.00	1.92%
11	87048.00	837.00	0.96%
12	86211.00	1674.00	1.94%
13	85374.00	837.00	0.98%

Eficiencia del intercambiador de calor de tubos concéntricos

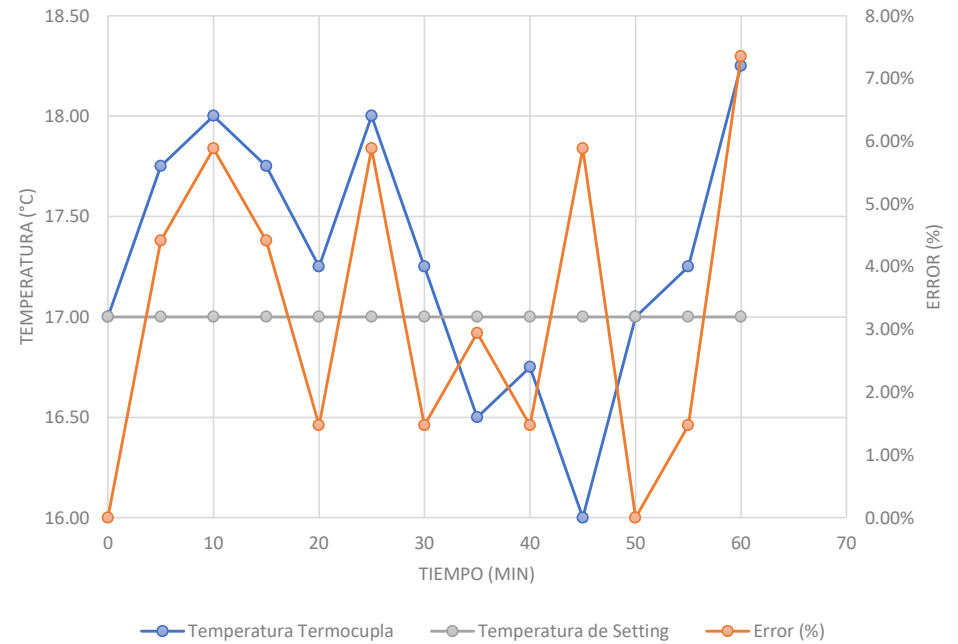


ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA CONTROLADA

Temperatura de ingreso en HMI de 19.5 °C

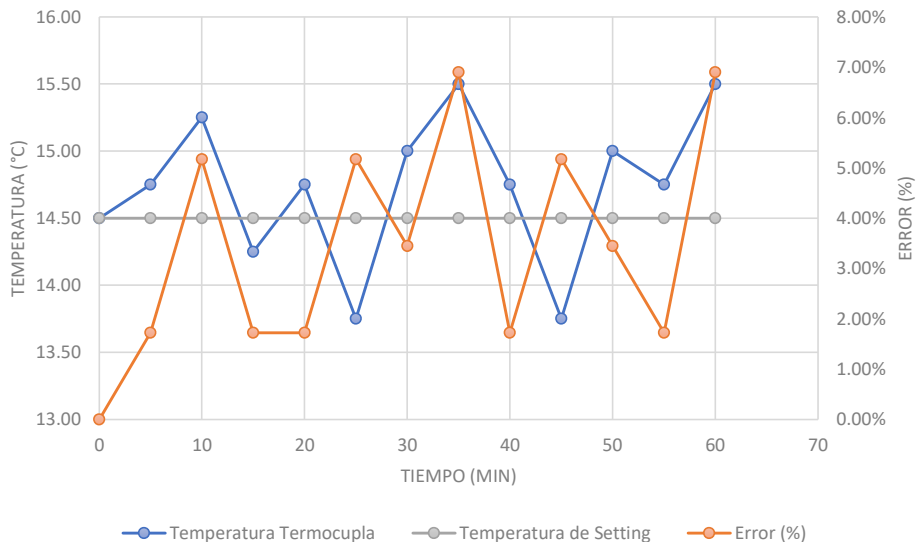


Temperatura de ingreso en HMI de 17 °C

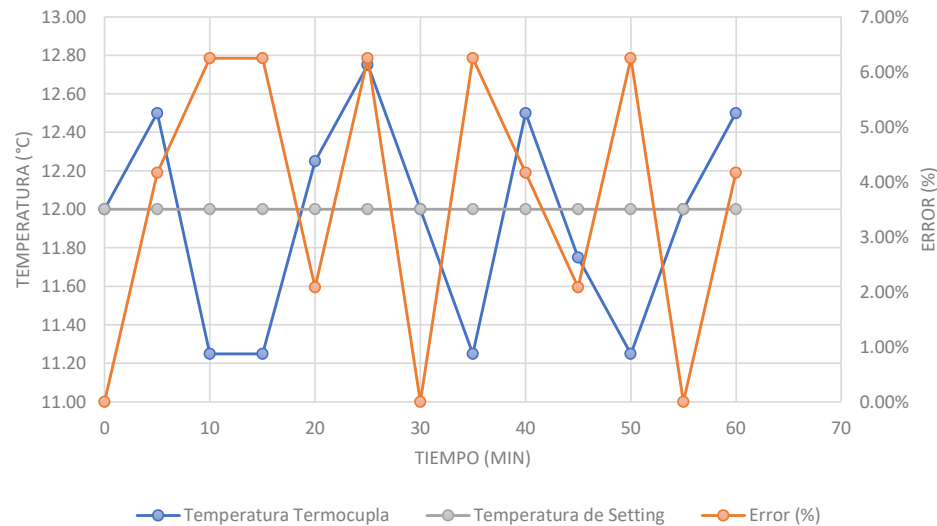


ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA CONTROLADA

Temperatura en HMI de 14.5 °C



Temperatura en HMI de 12 °C



ORD	Temperatura Setting (°C)	Temperatura \bar{T}_{ci}	Desviación Estándar	Error (%)
1	19.5	19.58	0.4	1.38
2	17.0	17.29	0.65	3.28
3	14.5	14.73	0.56	3.45
4	12.0	11.94	0.55	3.69



CONCLUSIONES

- Los ciclos de refrigeración teóricos muestran a cuatro elementos fundamentales (compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador) como pilares fundamentales para el funcionamiento de un sistema de refrigeración. No obstante, un sistema de refrigeración cuenta con más elementos y características importantes que cumplen con los requerimientos que se necesitan en la práctica, como se mostró en Capítulo III.
- A partir del estudio térmico de un sistema de refrigeración por compresión de vapor, se determina que es posible controlar la temperatura cuando el sistema solamente trabaja para refrigerar o para calentar un medio circundante por separado, aplicando el control de dos posiciones juntamente con el control PID que regula el flujo de refrigerante en el sistema.
- Partiendo del modelamiento dinámico del sistema de refrigeración en el evaporador y condensador, se determina que la temperatura del condensador será dependiente del comportamiento del evaporador, por lo que aplicar un control independiente con este sistema no sería posible.



CONCLUSIONES

- La mejor estrategia de control para enfriar el agua es trabajar en conjunto con el control de dos posiciones, que controla al compresor para encender cuando necesita bajar la temperatura o apagar cuando ha llegado a la temperatura requerida en el evaporador, por otro lado, el control PID aplicado en el sistema de refrigeración permite controlar el flujo de refrigerante en el evaporador para enfriar el agua garantizando que el refrigerante llegue totalmente evaporado a una temperatura de sobrecalentamiento antes de ingresar al compresor.
- Comparando los métodos de control para aplicarlos en el sistema de refrigeración se determina que el control PID es el más adecuado, debido a que se estabiliza a los 7s, que comparado con los controles P y PI tardan 10 s en estabilizar el sistema.
- Al realizar el análisis de eficiencia del intercambiador de calor de tubo concéntrico, proporcionado por el Laboratorio de Conversión de la Energía, se obtuvo una eficiencia promedio de 2.35%. Valoración que se justifica debido al diseño y construcción sin normas certificadas del intercambiador de calor utilizado.



CONCLUSIONES

- Al analizar los datos obtenidos en la experimentación con el equipo Banco de Pruebas, se concluye que el equipo permite obtener una temperatura de ingreso de agua con un error porcentual promedio de 2.95% con relación a la temperatura de setting, además se evidencia un comportamiento en el error porcentual inversamente proporcional a la temperatura de setting en la interfaz HMI, es decir mientras menor sea la temperatura establecida el error porcentual incrementará.



RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio termo – físico computarizado de los cambios de fase en el refrigerante durante todo el proceso dentro del circuito de refrigeración, con el fin de determinar con mayor precisión su comportamiento y la transferencia de calor capaz de realizar.
- Incorporar un sistema de agitación o enfriamiento en el recipiente de calentamiento de fluido (condensador) para poder implementar un control PID adecuado, teniendo variables influyentes en las propiedades del fluido de manera que controle el cambio de la temperatura.
- Aplicar un sistema de enfriamiento para disipar el calor generado en el compresor, debido a que al realizar un trabajo constante tiende a sobrecalentarse, causando averías y reduciendo la vida útil del compresor.
- Al realizar las prácticas en el banco de pruebas se debe evitar trabajar a una temperatura mayor de 55 °C en el aceite, debido a que afecta considerablemente el funcionamiento del sistema de refrigeración, debido a que el refrigerante que circula por el serpentín del condensador eleva su temperatura y por ende su presión ocasionando paros del sistema de refrigeración por la acción del presostato de alta presión como medida de seguridad para proteger el compresor.



MUCHAS GRACIAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA