



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Caracterización de un intercambiador de calor de tubos concéntricos de simple fase para aplicaciones sanitarias en la industria farmacéutica

Autor: Tubón Calderón, Santiago Fernando

Director: ING. Olmedo Salazar, José Fernando

Sangolquí, 31 de agosto de 2022



INTRODUCCIÓN



NUESTRA EXPERIENCIA ES VIDA.

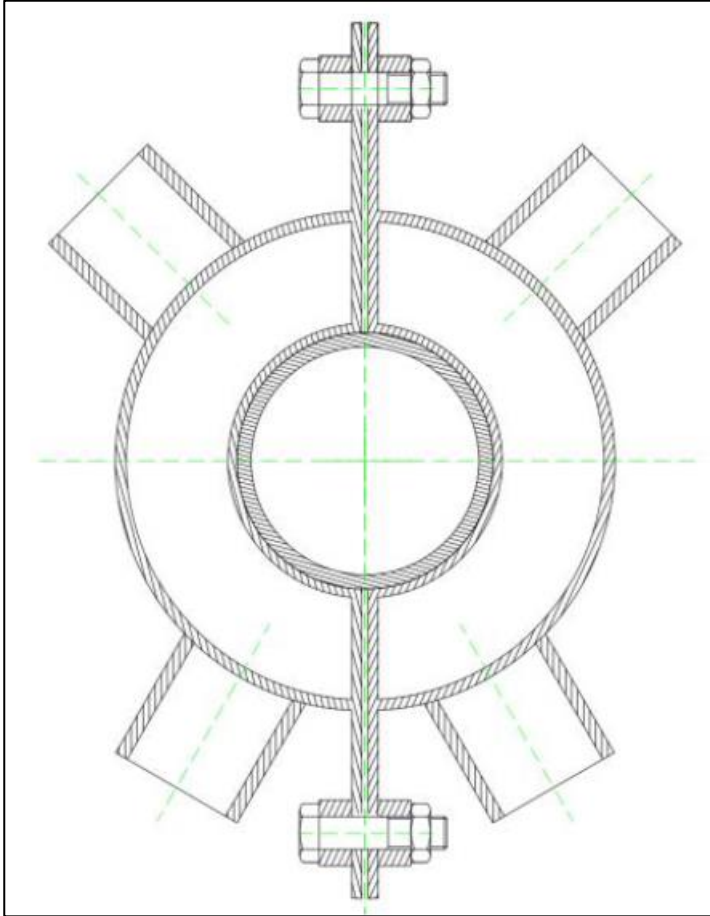


- Entidad farmacéutica líder en el mercado nacional e internacional.
- Producción farmacéutica en base a BPM.
- Sólidos no betalactámicos, líquidos, antibióticos betalactámicos e inyectables.
- Sanidad animal: producción biológica de vacunas, tópicos y bacterinas.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Definición del problema



- Contaminación cruzada.
- Eficiencia del intercambiador de calor.
- Sistema de control del LOOP de agua inyectable de menor volumen.

Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).

Objetivos

General

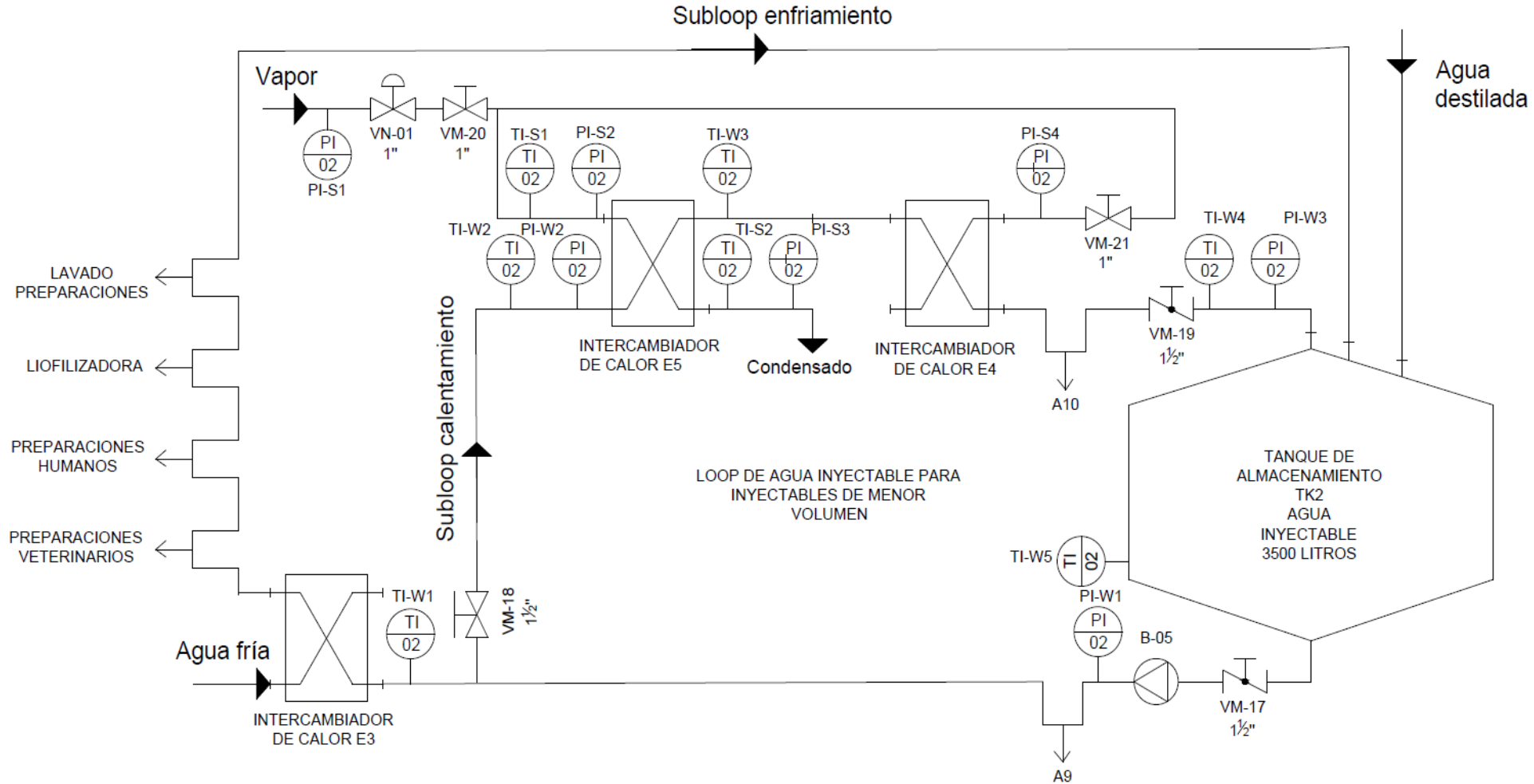
Caracterizar un intercambiador de calor de tubos concéntricos de simple fase para aplicaciones sanitarias en la industria farmacéutica.

Específicos:

- Calcular los parámetros y variables de interés en el equipo e identificar la dependencia funcional de las variables dependientes utilizando el diseño de experimentos por la metodología de superficie de respuesta.
- Simular el proceso mediante el software ANSYS Fluent y comparar los resultados obtenidos con los resultados experimentales.
- Determinar la combinación de flujos máxicos más óptima con la cual el intercambiador de calor entregue el mayor rendimiento posible.

LOOP DE AGUA INYECTABLE DE MENOR VOLUMEN





Descripción del proceso de control



Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).

LOOP DE AGUA INYECTABLE DE MENOR VOLUMEN







Sensores de presión para la toma de datos

PI-S2	PI-S3	PI-W2	PI-W3
 A circular pressure gauge with a white face and black markings. The needle is pointing to approximately 10. The gauge has a blue handle on the left and is mounted on a metal pipe. The brand name 'MINIERS' is visible at the bottom.	 A circular pressure gauge with a white face and black markings. The needle is pointing to approximately 10. The gauge has a blue handle on the right and is mounted on a metal pipe. The brand name 'MINIERS' is visible at the bottom.	 A circular pressure gauge with a white face and black markings. The needle is pointing to approximately 3.5. The gauge has a blue handle on the right and is mounted on a metal pipe. The brand name 'MINIERS' is visible at the bottom.	 A circular pressure gauge with a white face and black markings. The needle is pointing to approximately 3.5. The gauge has a blue handle on the right and is mounted on a metal pipe. The brand name 'CATHERM' is visible at the bottom.

Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).

LOOP DE AGUA INYECTABLE DE MENOR VOLUMEN

Sensores de temperatura para la toma de datos

TI-W2	TI-W3	TT-S1
		
TT-S2	TI-SN	TI-SN
		

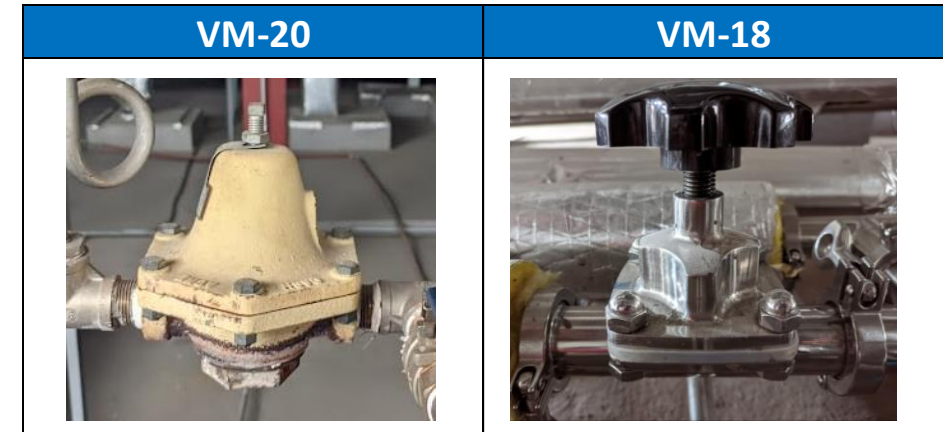
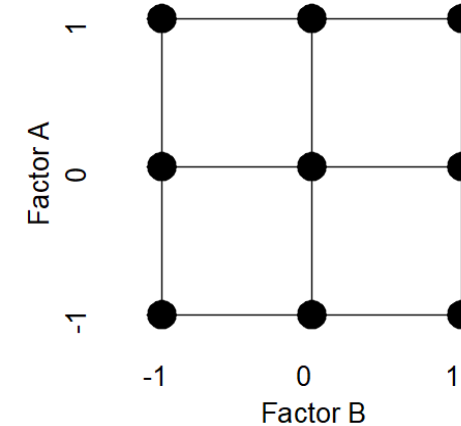
Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Diseño de experimentos por la metodología de superficie de respuesta

Factores y niveles del estudio

Factor	Nivel	Valor referencial
Flujo másico de agua inyectable (% abertura válvula VM-18)	Nivel 1	90 % abertura válvula VM-18
	Nivel 2	60 % abertura válvula VM-18
	Nivel 3	30 % abertura válvula VM-18
Flujo másico de vapor industrial (Presión de salida válvula reductora VM-20)	Nivel 1	Reducción de 80 a 60 psi válvula VM-20
	Nivel 2	Reducción de 80 a 40 psi válvula VM-20
	Nivel 3	Reducción de 80 a 20 psi válvula VM-20



Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

Toma de datos experimentales

Unidades Codificadas		Unidades Originales		AGUA INYECTABLE				VAPOR INDUSTRIAL			
Factor A: x ₁	Factor B: x ₂	Porcentaje Abertura VM-18 (%)	Presión de salida VM-20 (psi)	Ti (°C)	To (°C)	Pi (psi)	Po (psi)	Ti (°C)	To (°C)	Pi (psi)	Po (psi)
1	1	90	60	71,00	75,43	43,33	40,33	137,54	91,34	60,00	52,00
1	0	90	40	71,33	75,07	43,07	40,00	126,21	90,64	40,00	31,33
1	-1	90	20	71,33	74,11	43,47	42,00	105,26	86,34	20,00	14,67
0	1	60	60	69,33	75,77	41,73	38,00	142,87	91,78	60,00	52,00
0	0	60	40	68,67	74,85	41,47	38,00	128,40	91,11	40,00	32,00
0	-1	60	20	70,67	75,10	41,33	40,00	111,17	86,34	20,00	11,33
-1	1	30	60	65,33	75,90	39,87	36,33	145,15	92,04	60,00	51,33
-1	0	30	40	66,67	74,92	40,67	36,67	135,89	90,17	40,00	28,67
-1	-1	30	20	68,67	75,03	40,27	38,00	113,21	88,17	20,00	10,67

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

Temperaturas y presiones medias

Unidades Codificadas		AGUA INYECTABLE		VAPOR INDUSTRIAL	
Factor A:	Factor B:	\bar{T}_w (°C)	\bar{P}_w (kPa)	\bar{T}_s (°C)	\bar{P}_s (kPa)
x_1	x_2				
1	1	73.22	288.43	144.44	386.11
1	0	73,20	286,36	108,43	245,91
1	-1	72,72	294,64	95,80	119,51
0	1	72,55	274,87	117,33	386,11
0	0	71,76	273,95	109,76	248,21
0	-1	72,88	280,39	98,76	108,02
-1	1	70,62	262,69	118,6	383,81
-1	0	70,79	266,61	113,03	236,72
-1	-1	71,85	269,81	100,69	105,72

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

Flujo volumétrico agua inyectable

Porcentaje de abertura	Tiempo	Flujo volumétrico
Válvula VM-18 (%)	(s)	(L/s)
90	7.78	3.213
60	8.91	2.806
30	10.36	2.413

Flujo másico vapor industrial

Presión (kPa)		Flujo másico \dot{m}_s (kg/h)
ENT.	SAL.	
5,30	1,00	100,00
7,00		127,00
5,30	2,10	120,00
7,00		152,00
5,30	3,50	129,00
7,00		183,00



Nota. Adaptado de (Varymex, s.f.).

Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

Flujos máxicos promedio de agua inyectable y vapor industrial datos experimentales

Unidades Codificadas		Unidades Originales	
Factor A:	Factor B:	\dot{m}_w	\dot{m}_s
x_1	x_2	(kg/h)	(kg/h)
1	1	11290,45	135,83
1	0	11290,56	115,48
1	-1	11293,84	94,99
0	1	9862,43	135,83
0	0	9867,08	116,50
0	-1	9860,50	86,42
-1	1	8491,76	135,07
-1	0	8490,91	111,44
-1	-1	8485,61	84,70

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

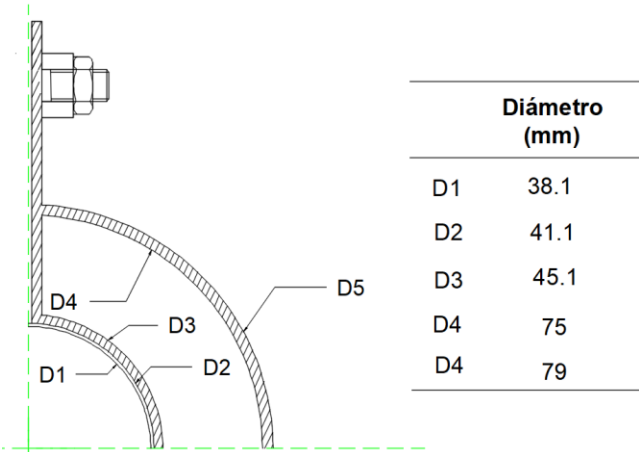
Memoria de cálculo

Número de Reynolds para el agua

$$Re_w = \frac{4 \cdot \dot{m}_w}{\pi \cdot D_i \cdot \mu_w}$$

Número de Reynolds para el vapor

$$Re_s = \frac{4 \cdot \dot{m}_s}{\pi \cdot D_h \cdot \mu_s}$$



Unidades Codificadas		Re_w	Re_s
Factor A: x_1	Factor B: x_2		
1	1	270973,55	117037,08
1	0	270915,64	103540,39
1	-1	269271,81	90405,42
0	1	234613,36	117037,08
0	0	232234,44	104363,91
0	-1	235605,85	82908,82
-1	1	196799,83	116444,81
-1	0	197251,29	100237,02
-1	-1	199968,19	81394,84

Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

Número de Prandtl

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

Unidades Codificadas		Pr_w	Pr_s
Factor A: x_1	Factor B: x_2		
1	1	2,48	1,02
1	0	2,52	1,03
1	-1	2,53	1,05
0	1	2,45	1,02
0	0	2,49	1,03
0	-1	2,46	1,05
-1	1	2,45	1,02
-1	0	2,44	1,03
-1	-1	2,43	1,05



CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

Número de Nusselt – Correlación de Gnielinski

Condiciones requeridas		Condiciones actuales			
Intervalo Prandtl	Intervalo Reynolds	Intervalo Prandtl		Intervalo Reynolds	
		Agua	Vapor	Agua	Vapor
$0.5 < Pr < 2000$	$3000 < Re < 5 \times 10^6$	$2.4 < Pr_w < 2.5$	$1.01 < Pr_s < 1.05$	$19800 < Re_w < 28000$	$8 \times 10^4 < Re_w < 2.8 \times 10^4$

$$\frac{L}{D_1} \geq 10$$

$$Nu_D = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)}$$

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

Factor de fricción– Correlación de Pethukov

$$f = (0.790 \cdot \ln(Re_D) - 1.64)^{-2} \quad 3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$$

Números de Nusselt y factor de fricción agua inyectable y vapor industrial datos experimentales

Unidades Codificadas					
Factor A:	Factor B:	Nu_w	Nu_s	f_w	f_s
x_1	x_2				
1	1	839,11	259,94	0,01472	0,01741
1	0	839,07	233,19	0,01472	0,01786
1	-1	837,88	207,52	0,01474	0,01838
0	1	747,20	259,94	0,01513	0,01741
0	0	745,40	234,71	0,01516	0,01783
0	-1	747,95	193,57	0,01512	0,01873
-1	1	654,41	258,84	0,01566	0,01743
-1	0	654,76	227,07	0,01566	0,01798
-1	-1	656,94	190,73	0,01561	0,01880

Coefficiente de convección agua

$$h_w = \frac{k \cdot Nu_w}{D_1}$$

Coefficiente de convección vapor

$$h_s = \frac{k \cdot Nu_s}{D_h}$$

Unidades Codificadas		h_w	h_s
Factor A: x_1	Factor B: x_2	(W/m ² K)	(W/m ² K)
1	1	14660,11	264,93
1	0	14659,1	221,1
1	-1	14630,76	177,83
0	1	13044,77	264,93
0	0	13001,72	222,86
0	-1	13062,56	163,76
-1	1	11399,81	263,54
-1	0	11408,14	214,06
-1	-1	11459,88	160,92

Memoria de cálculo

Diferencia de temperatura media logarítmica ΔT_{ml}

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Donde:

ΔT_1 : Diferencia de temperatura a la entrada del intercambiador.

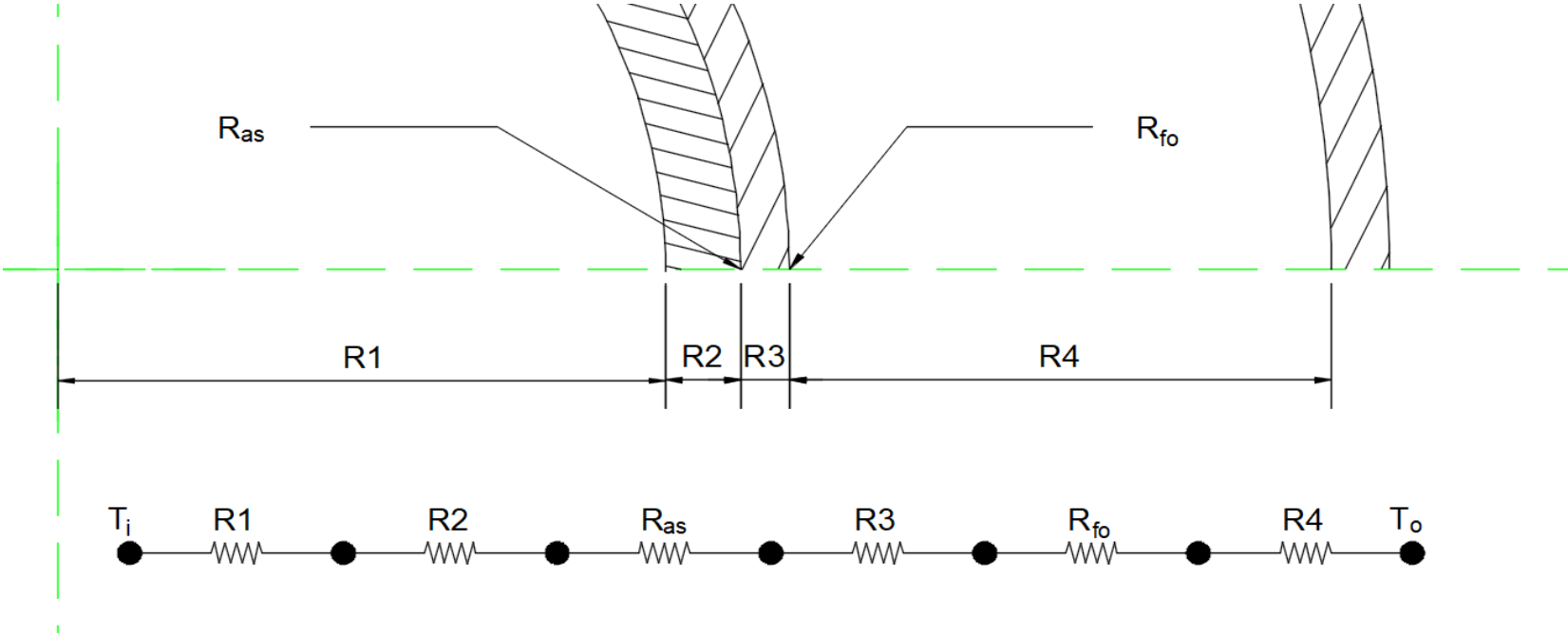
ΔT_2 : Diferencia de temperatura a la salida del intercambiador.

Unidades Codificadas		ΔT_{ml} (°C)
Factor A: x_1	Factor B: x_2	
1	1	35,38
1	0	31,20
1	-1	21,26
0	1	37,73
0	0	33,41
0	-1	22,83
-1	1	39,84
-1	0	35,68
-1	-1	25,72

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

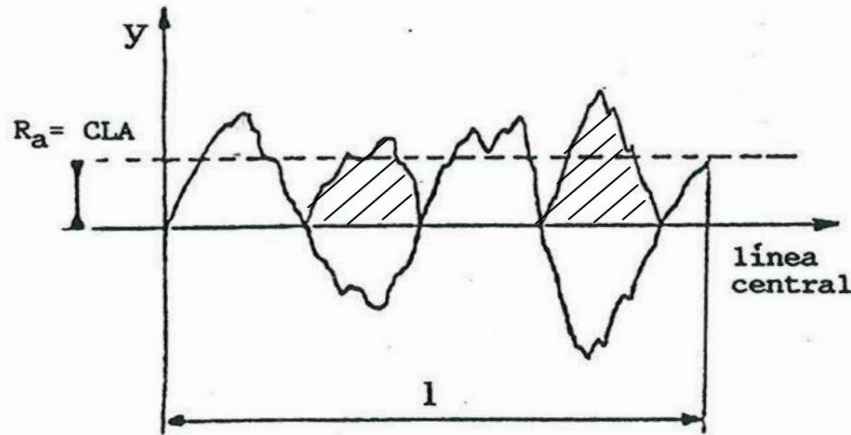
Coefficiente global de transferencia de calor



Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).

Coeficiente global de transferencia de calor – Resistencia por acabado superficial

Tubería sanitaria con una rugosidad superficial R_a de $0.25 \mu m$



$$R_{at} = 8 \cdot R_a$$

Donde:

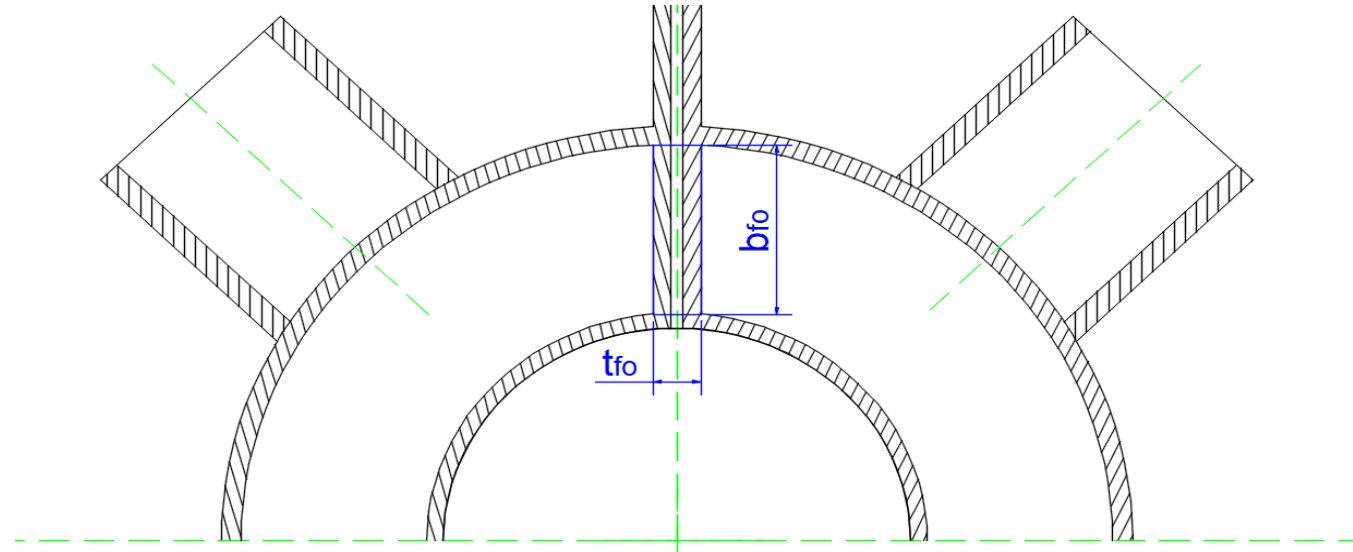
R_{at} : Rugosidad aritmética media total

R_a : Rugosidad aritmética media de $0.25 \mu m$

$$R_{as} = \frac{\ln\left(\frac{D_t}{D_3}\right)}{2\pi L k_{aire}}$$

Nota. Tomado de (Baró, 2012).

Coeficiente global de transferencia de calor – Áreas



Área superficial de las aletas

$$A_{fo} = 2 \cdot n \cdot b_{fo} \cdot L$$

Área de superficie exterior

$$A_o = [\pi \cdot D_3 + n(2b_{fo} - t_{fo})]L$$

Área de superficie interior

$$A_i = \pi \cdot D_1 \cdot L$$

Nota. Tomado de (Laboratorios LIFE, 2022).

Coeficiente global de transferencia de calor

$$U_o = \frac{1}{A_o \left\{ \frac{1}{h_w A_i} + \frac{1}{2\pi L k_{acero} \left[\ln \left(\frac{D_3}{D_1} \right) \right]} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{h_s A_o} + \frac{1}{2\pi L k_{aire} \left[\ln \left(\frac{D_t}{D_2} \right) \right]} \right\}}$$

$$U_i = \frac{1}{A_i \left\{ \frac{1}{h_w A_i} + \frac{1}{2\pi L k_{acero} \left[\ln \left(\frac{D_3}{D_1} \right) \right]} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{h_s A_o} + \frac{1}{2\pi L k_{aire} \left[\ln \left(\frac{D_t}{D_2} \right) \right]} \right\}}$$

Donde:

A_o : Área de superficie exterior (0.87096 m²).

A_i : Área de superficie interior (0.53863 m²).

h_w : Coeficiente de transferencia de calor por convección de agua (W/m²K).

h_s : Coeficiente de transferencia de calor por convección de vapor (W/m²K).

L : Longitud total de los intercambiadores de calor E5 (4.5 m).

R_{fo} : Resistencia por incrustación en la región anular (0.0001 m²C/W).

k_{acero} : Conductividad térmica del acero inoxidable (16.3 W/mK)

k_{aire} : Conductividad térmica del aire (0.024 W/mK).

CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO

Memoria de cálculo

Coefficiente global de transferencia de calor para datos experimentales

Unidades Codificadas		U_o (W/m ² K)	U_i (W/m ² K)
Factor A:	Factor B:		
x_1	x_2		
-1	-1	229,04	370,25
0	-1	195,53	316,08
1	-1	160,91	260,10
-1	0	228,33	369,10
0	0	196,36	317,42
1	0	149,00	240,86
-1	1	226,38	365,94
0	1	188,88	305,32
1	1	146,28	236,46

Memoria de cálculo

Potencia térmica transferida para datos experimentales

$$\dot{Q} = U_i A_i \Delta T_{ml}$$

Se cumple la relación

$$U_i A_i = U_o A_o,$$

Unidades Codificadas		\dot{Q} (W)
Factor A: x_1	Factor B: x_2	
-1	-1	7056,01
0	-1	5312,56
1	-1	2979,16
-1	0	7501,49
0	0	5712,25
1	0	2961,57
-1	1	7852,12
0	1	5867,48
1	1	3275,87

Metodología de superficie de respuesta MSR

Modelo de diseño factorial completo 3^k

$$N = 3^k$$

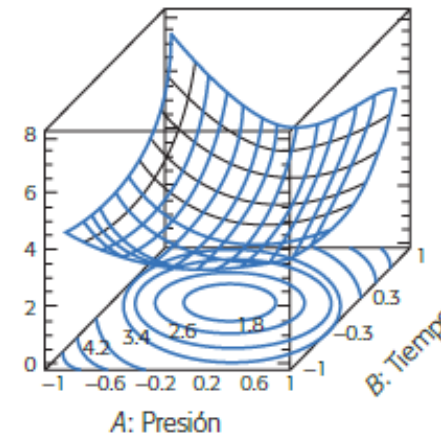
Regresión lineal múltiple de segundo orden

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{<i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

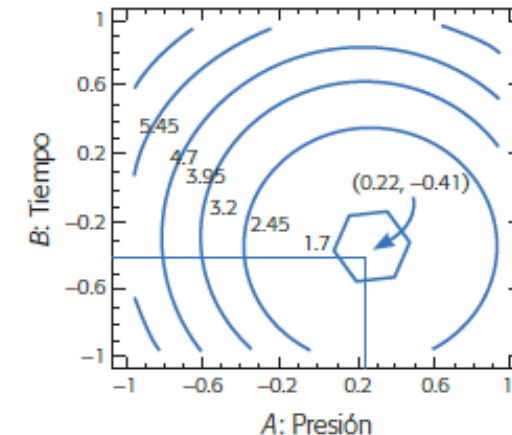
Para $k = 2$ factores x_1 y x_2 , el modelo es entonces:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \varepsilon$$

a) Gráfica de superficie



b) Gráfica de contornos



Nota. Tomado de (Pulido et al., 2012).

Metodología de superficie de respuesta MSR

Variables de respuesta en el estudio

No.	Variable de respuesta Y	Objetivo
1	Potencia térmica transferida (W)	Maximizar
2	Coeficiente global de transferencia de calor interno U_i (W/m ² K)	Maximizar
3	Coeficiente global de transferencia de calor externo U_o (W/m ² K)	Maximizar
4	Diferencia de temperatura de agua ΔT_w (°C)	Maximizar
5	Diferencia de temperatura de vapor ΔT_s (°C)	Maximizar
6	Diferencia de presión de agua ΔP_w (psi)	Maximizar
7	Diferencia de presión de vapor ΔP_s (psi)	Maximizar

Metodología de superficie de respuesta MSR

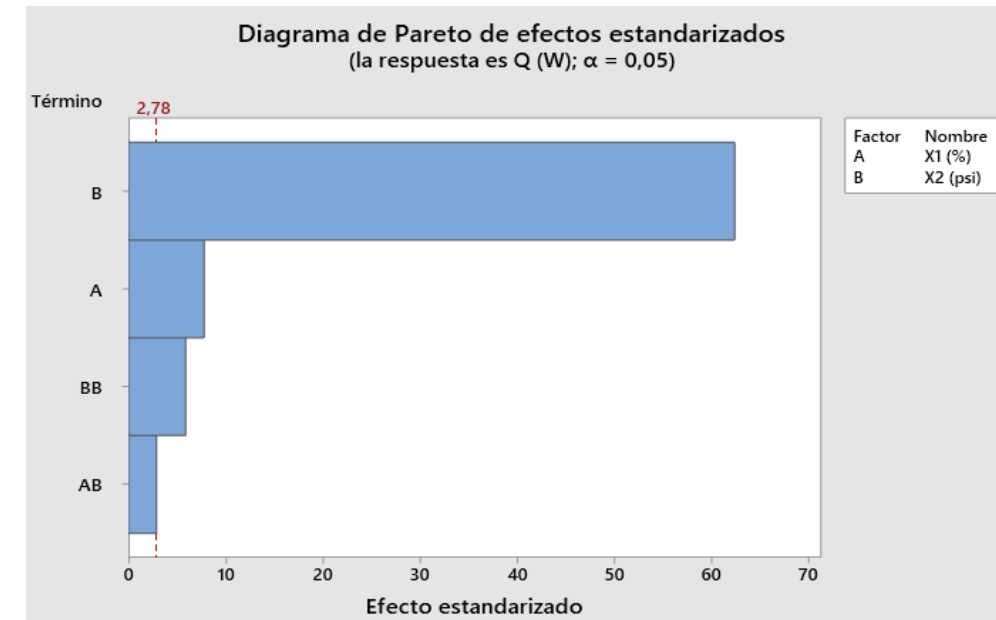
Análisis de superficies de respuesta en MINITAB

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	X1 (%)	X2 (psi)	Q (W)	Ui (W/m ² K)	Uo (W/m ² K)	ΔTw (C)	ΔTs (C)	ΔPw (C)	ΔPs (C)
1	90	60	7056,01	370,249	229,045	4,4333	46,20	3,00000	8,0000
2	90	40	5312,56	316,079	195,533	3,7333	35,57	3,06667	8,6667
3	90	20	2979,16	260,103	160,906	2,7767	18,92	1,46667	5,3333
4	60	60	7501,49	369,095	228,331	6,4367	51,09	3,73333	8,0000
5	60	40	5712,25	317,420	196,363	6,1833	37,29	3,46667	8,0000
6	60	20	2961,57	240,861	149,002	4,4333	24,83	1,33333	8,6667
7	30	60	7852,12	365,943	226,380	10,5667	53,11	3,53333	8,6667
8	30	40	5867,48	305,320	188,878	8,2533	45,72	3,99667	11,3333
9	30	20	3275,87	236,457	146,278	6,3667	25,04	2,26667	9,3333

Metodología de superficie de respuesta MSR

Análisis de superficies de respuesta en MINITAB

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	X1 (%)	X2 (psi)	Q (W)	U _i (W/m ² K)	U _o (W/m ² K)	ΔT _w (C)	ΔT _s (C)	ΔP _w (C)	ΔP _s (C)
1	90	60	7056,01	370,249	229,045	4,4333	46,20	3,00000	8,0000
2	90	40	5312,56	316,079	195,533	3,7333	35,57	3,06667	8,6667
3	90	20	2979,16	260,103	160,906	2,7767	18,92	1,46667	5,3333
4	60	60	7501,49	369,095	228,331	6,4367	51,09	3,73333	8,0000
5	60	40	5712,25	317,420	196,363	6,1833	37,29	3,46667	8,0000
6	60	20	2961,57	240,861	149,002	4,4333	24,83	1,33333	8,6667
7	30	60	7852,12	365,943	226,380	10,5667	53,11	3,53333	8,6667
8	30	40	5867,48	305,320	188,878	8,2533	45,72	3,99667	11,3333
9	30	20	3275,87	236,457	146,278	6,3667	25,04	2,26667	9,3333



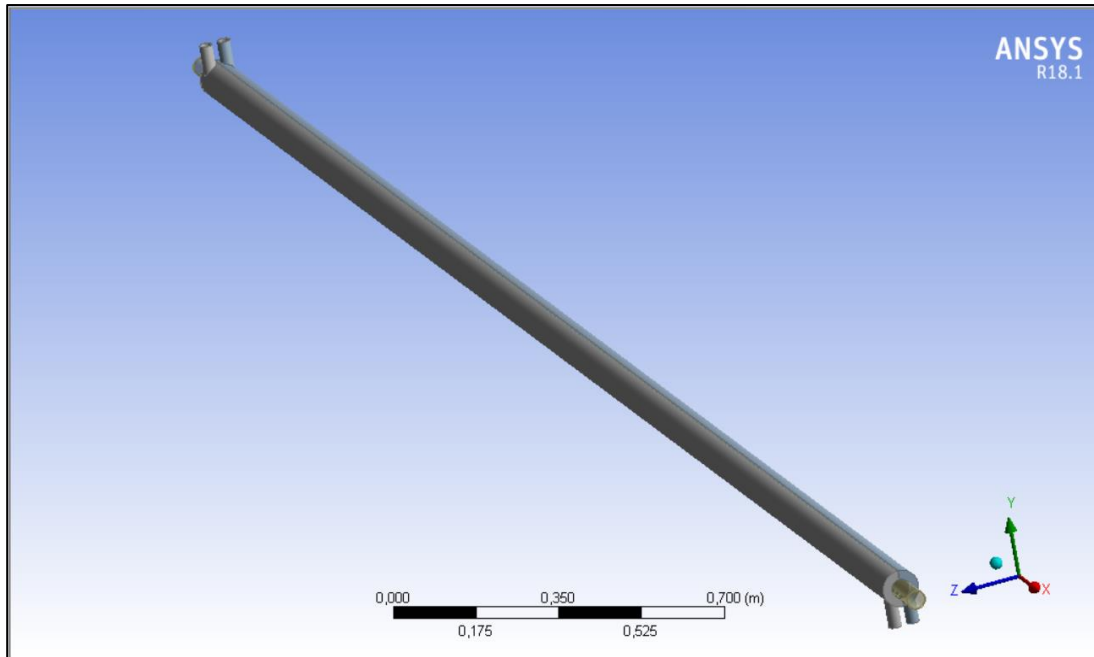
Metodología de superficie de respuesta MSR

Modelos ajustados de las variables de respuesta para datos experimentales

Modelo ajustado	R ² (%)
$\dot{Q} = -156 - 0.83 x_1 + 194.4x_2 - 0.899x_2^2 - 0.2081x_1x_2$	95.45
$U_i = 173,53 + 0,2151x_1 + 3,066x_2$	97,66
$U_o = 107,35 + 0,1330x_1 + 1,8964x_2$	97,66
$\Delta T_w = 5,49 - 0,0367x_1 + 0,1291x_2 - 0,001060x_1x_2$	93,05
$\Delta T_s = 8,07 - 0,1288x_1 + 1,279x_2 - 0,00749x_2^2$	95,25
$\Delta P_w = -1,287 - 0,01257x_1 + 0,2342x_2 - 0,002386x_2^2$	85,18
$\Delta P_s = 9,3333 - 1,333x_1 - 1,333x_2^2 + 0,833x_1x_2$	46,52

Preprocesamiento

Geometría

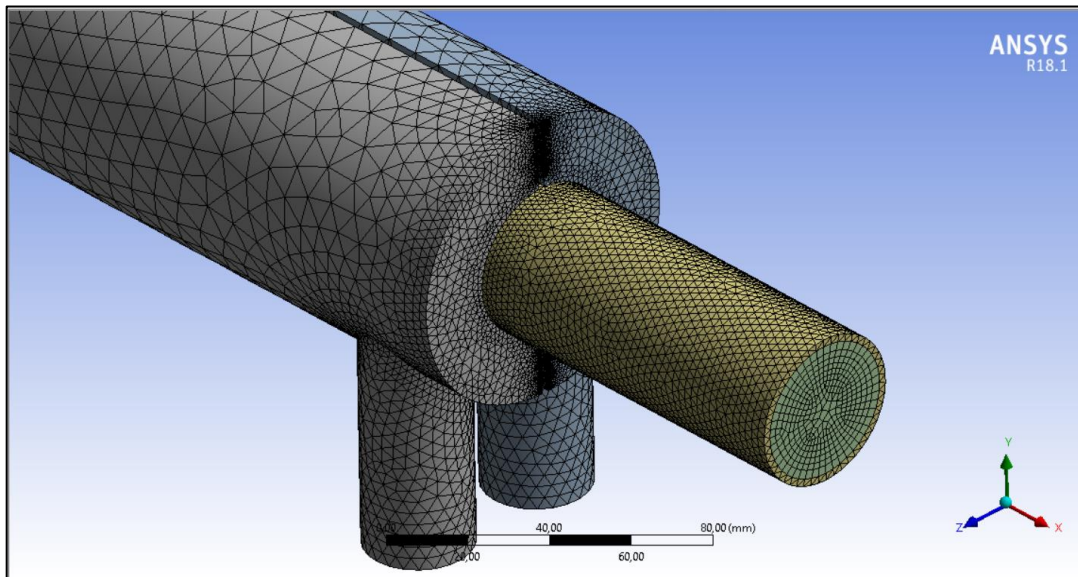


Dominios sólidos y de flujo en el sistema

Dominio	Descripción
Shell L Wall	Dominio sólido de las paredes de la carcasa izquierda
Shell R Wall	Dominio sólido de las paredes de la carcasa derecha
Tube Wall	Dominio sólido de las paredes del tubo central interior
Shell L Domain	Dominio del fluido interno de la carcasa izquierda
Shell R Domain	Dominio del fluido interno de la carcasa derecha
Tube Domain	Dominio del fluido interno del tubo central interior

Preprocesamiento

Mallado



- Mallado con la opción *Relevance Center* tipo *Fine*.
- *Se utiliza el comando Edge Sizing* para mallar uniformemente todos los bordes internos y externos de los dominios sólidos y fluidos que presentes ángulos rectos.

Simulación

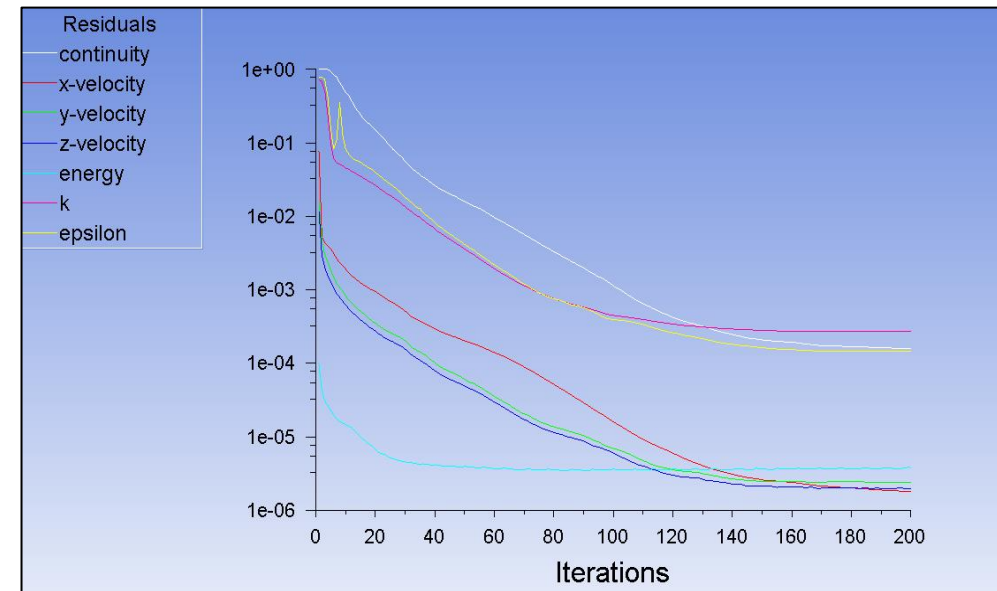
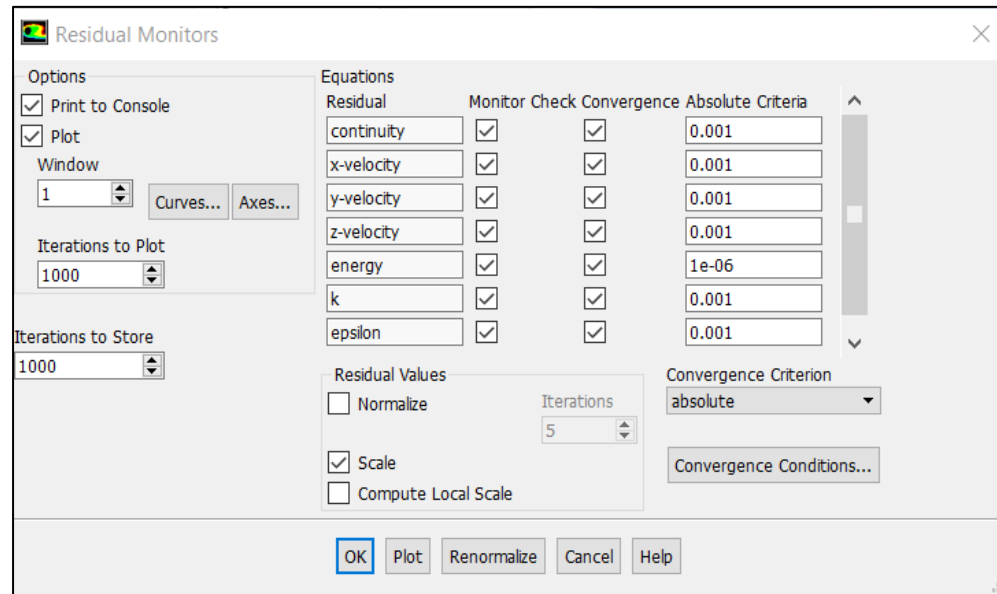
Configuraciones relevantes

- Sistema en estado transitorio, tomando en cuenta los efectos de la gravedad.
- Se realizarán en total 9 simulaciones, ingresando la presión y temperatura de entrada del agua y vapor.
- Se activa la opción de ecuación de la energía.
- Se selecciona el modelo de turbulencia realizable $k - \epsilon$.
- Se selecciona como fluidos de trabajo agua líquida en el interior y vapor de agua en la región central con propiedades termofísicas variables a lo largo del proceso. Para las paredes se selecciona acero inoxidable 316L.
- Las condiciones de frontera serán del tipo *pressure-inlet*.
- En la opción *Scheme* se selecciona el algoritmo *Coupled*.
- Se selecciona el método de mínimos cuadrados (*Least Squares Cell-Based*) para el cálculo de gradientes.
- En las opciones: *Momentum*, *Turbulent Kinetic Energy*, *Turbulent Disipation Rate* y *Energy*, para cada una, se selecciona el método de segundo orden.

Simulación

Configuraciones relevantes

- En la opción *Monitors/Residuals*, se configura la convergencia de la simulación.



SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL EN ANSYS FLUENT

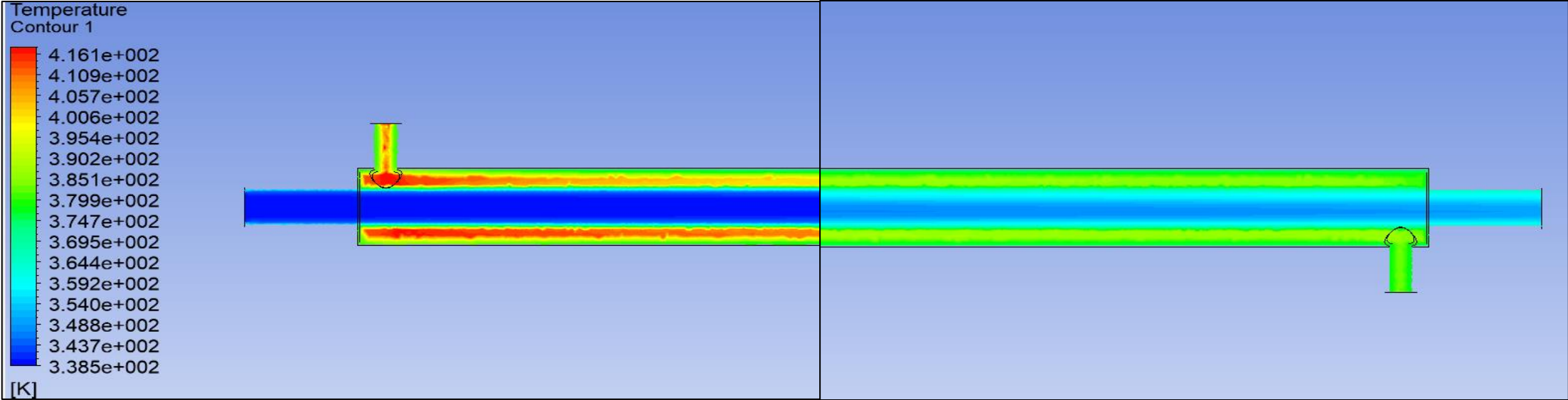
Simulación

Reports/Surface Integrals

U. Codificadas		U. Originales		AGUA INYECTABLE				VAPOR INDUSTRIAL			
Factor A: x_1	Factor B: x_2	% AB VM-18	Pi VM-20 (psi)	Ti (°C)	To (°C)	Pi (psi)	Po (psi)	Ti (°C)	To (°C)	Pi (psi)	Po (psi)
1	1	90	60	71,00	80,55	43,33	21,53	137,54	110,02	60,00	26,57
1	0	90	60	71,33	79,19	43,07	21,35	126,21	102,95	40,00	17,63
1	-1	90	60	71,33	76,15	43,47	21,58	105,26	90,34	20,00	8,75
0	1	60	40	69,33	80,07	41,73	20,57	142,87	112,49	60,00	26,57
0	0	60	40	68,67	77,38	41,47	20,39	128,40	103,10	40,00	17,63
0	-1	60	40	70,67	76,55	41,33	20,30	111,17	91,38	20,00	8,75
-1	1	30	20	65,33	77,25	39,87	19,45	145,15	112,21	60,00	26,70
-1	0	30	20	66,67	76,86	40,67	19,91	135,89	106,61	40,00	17,63
-1	-1	30	20	68,67	75,22	40,27	19,66	113,21	91,61	20,00	8,74

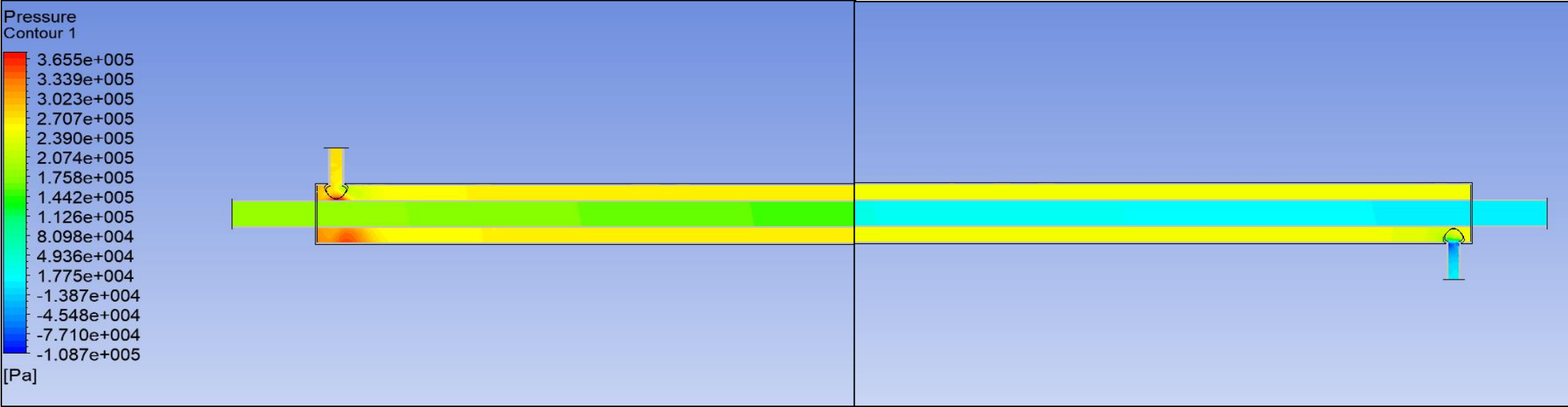
Postprocesamiento

Perfil de temperatura



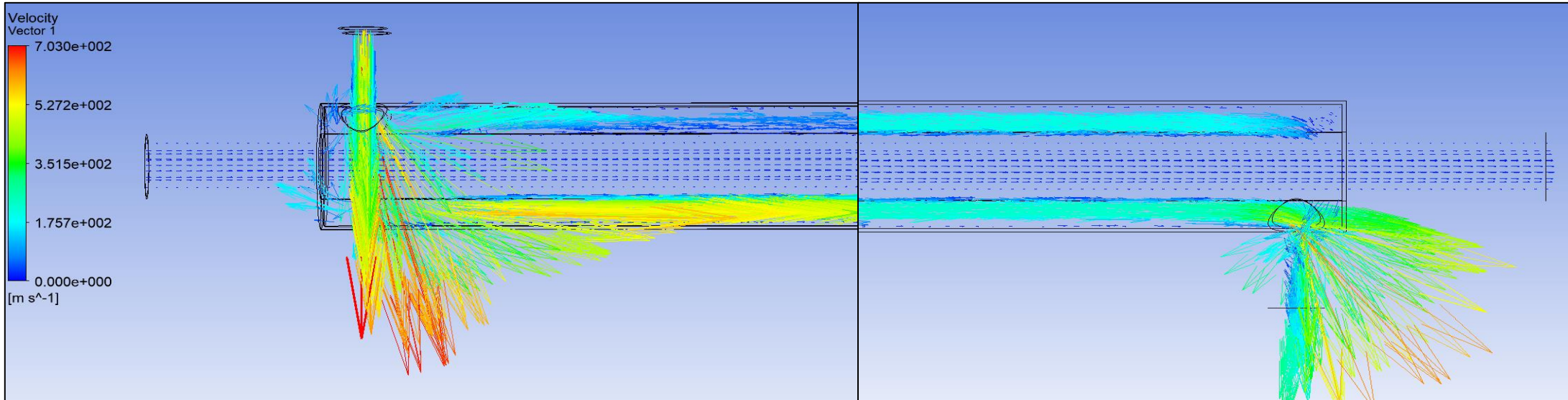
Postprocesamiento

Perfil de presión



Postprocesamiento

Vectores de velocidad



ANÁLISIS DE RESULTADOS

Cálculo de variables de respuesta con datos obtenidos en simulación

Variables de respuesta para datos simulados

U. Codificadas		\dot{Q} (W)	U_i (W/m ² K)	U_o (W/m ² K)	ΔT_w (°C)	ΔT_s (°C)	ΔP_w (psi)	ΔP_s (psi)
Factor A: x_1	Factor B: x_2							
1	1	7460,54	304,31	188,25	9,55	27,52	21,81	33,43
1	0	5389,32	269,17	166,51	7,86	23,26	21,71	22,37
1	-1	2761,98	226,41	140,06	4,81	14,92	21,89	11,25
0	1	8207,39	303,53	187,77	10,74	30,38	21,17	33,43
0	0	5838,40	268,52	166,12	8,71	25,30	21,07	22,37
0	-1	3109,97	225,99	139,80	5,89	19,79	21,04	11,25
-1	1	8863,38	302,82	187,33	11,91	32,94	20,42	33,30
-1	0	6740,65	267,75	165,64	10,19	29,28	20,75	22,37
-1	-1	3418,31	225,38	139,42	6,55	21,60	20,61	11,26

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Diseño de experimentos por metodología MSR para datos simulados

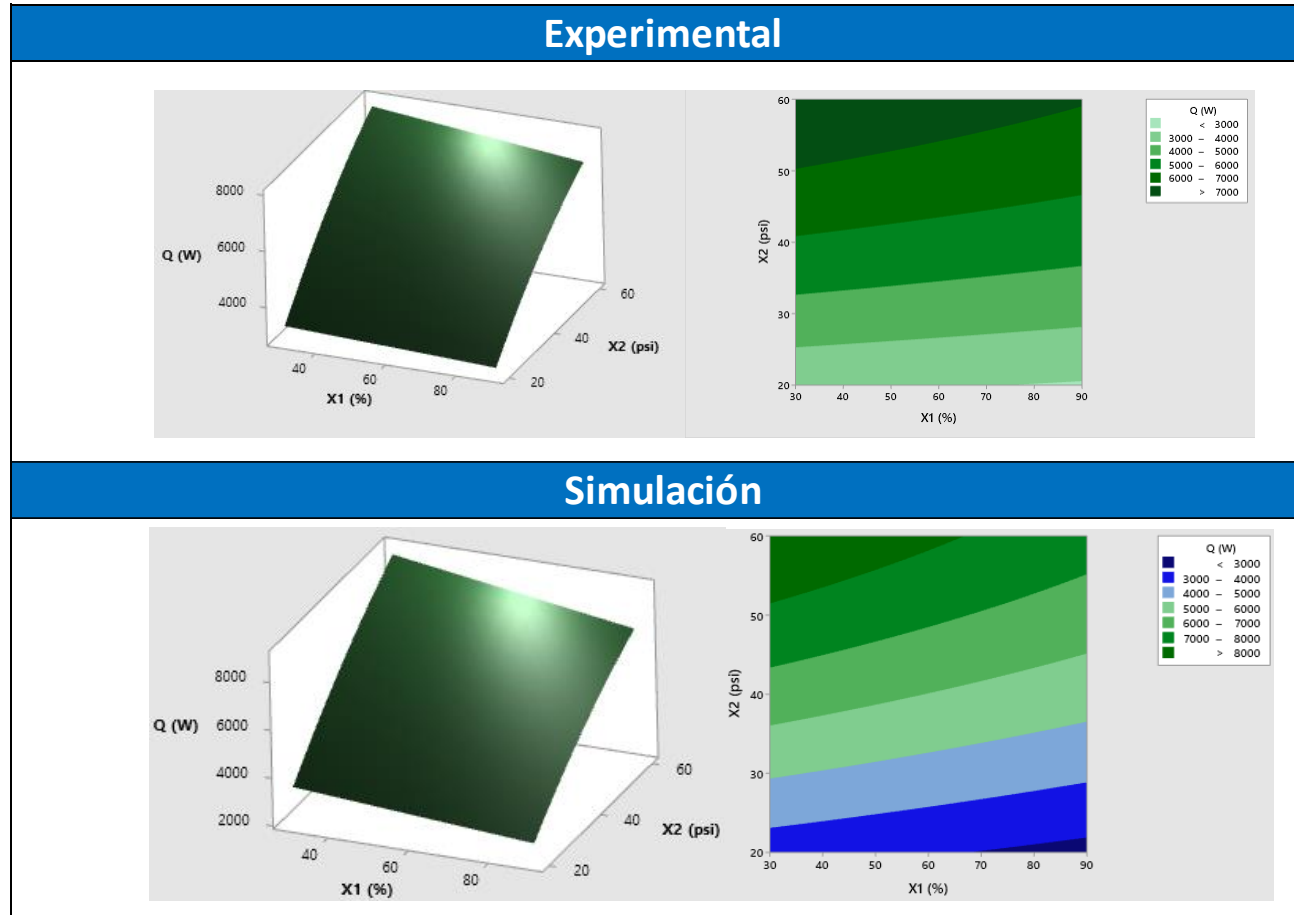
Análisis de las superficies de respuesta en MINITAB para datos de simulación

Modelo ajustado	R ² (%)
$\dot{Q} = -111 - 6.51 x_1 + 216.2x_2 - 0.881x_2^2 - 0.311x_1x_2$	99.07
$U_i = 175.040 + 0,01422x_1 + 2.6772x_2 - 0.009350x_2^2 + 0.000192x_1x_2$	100.00
$U_o = 108.263 + 0,00883x_1 + 1.65725x_2 - 0.005796x_2^2 + 0.000117x_1x_2$	100.00
$\Delta T_w = 3.367 - 0,03572x_1 + 0,2602x_2 - 0,001696x_2^2$	98.32
$\Delta T_s = 14.79 - 0,10067x_1 + 0.572x_2 - 0,00355x_2^2$	96.99
$\Delta P_w = 20 + 0,02017x_1 - 0.00117x_2$	90.37
$\Delta P_s = 22.37 + 11.0667x_2 - 0.05x_2^2 + 0,0350x_1x_2$	100.00

ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE GRÁFICAS DATOS EXPERIMENTALES VERSUS SIMULADOS

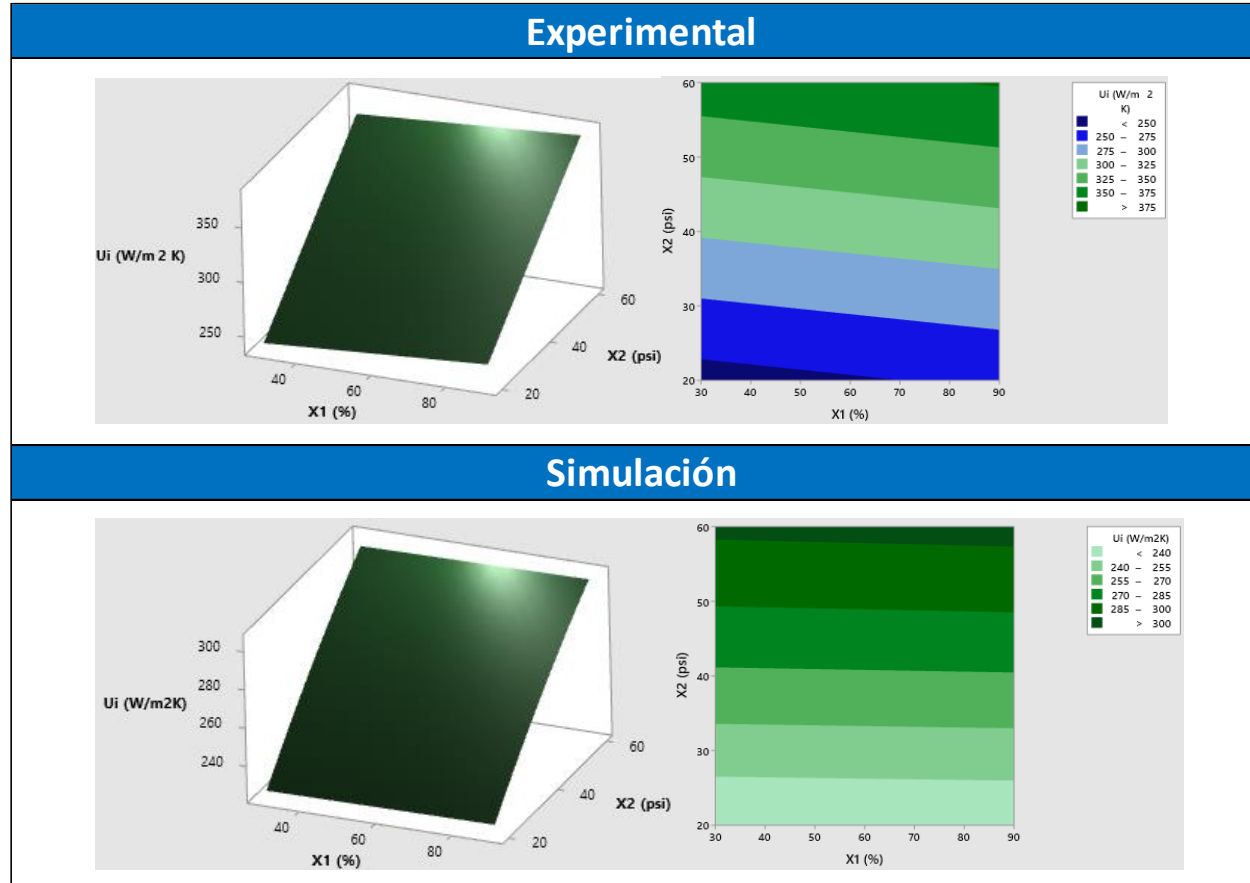
Potencia térmica \dot{Q} (W) vs; x_1 (%); x_2 (psi)



ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE GRÁFICAS DATOS EXPERIMENTALES VERSUS SIMULADOS

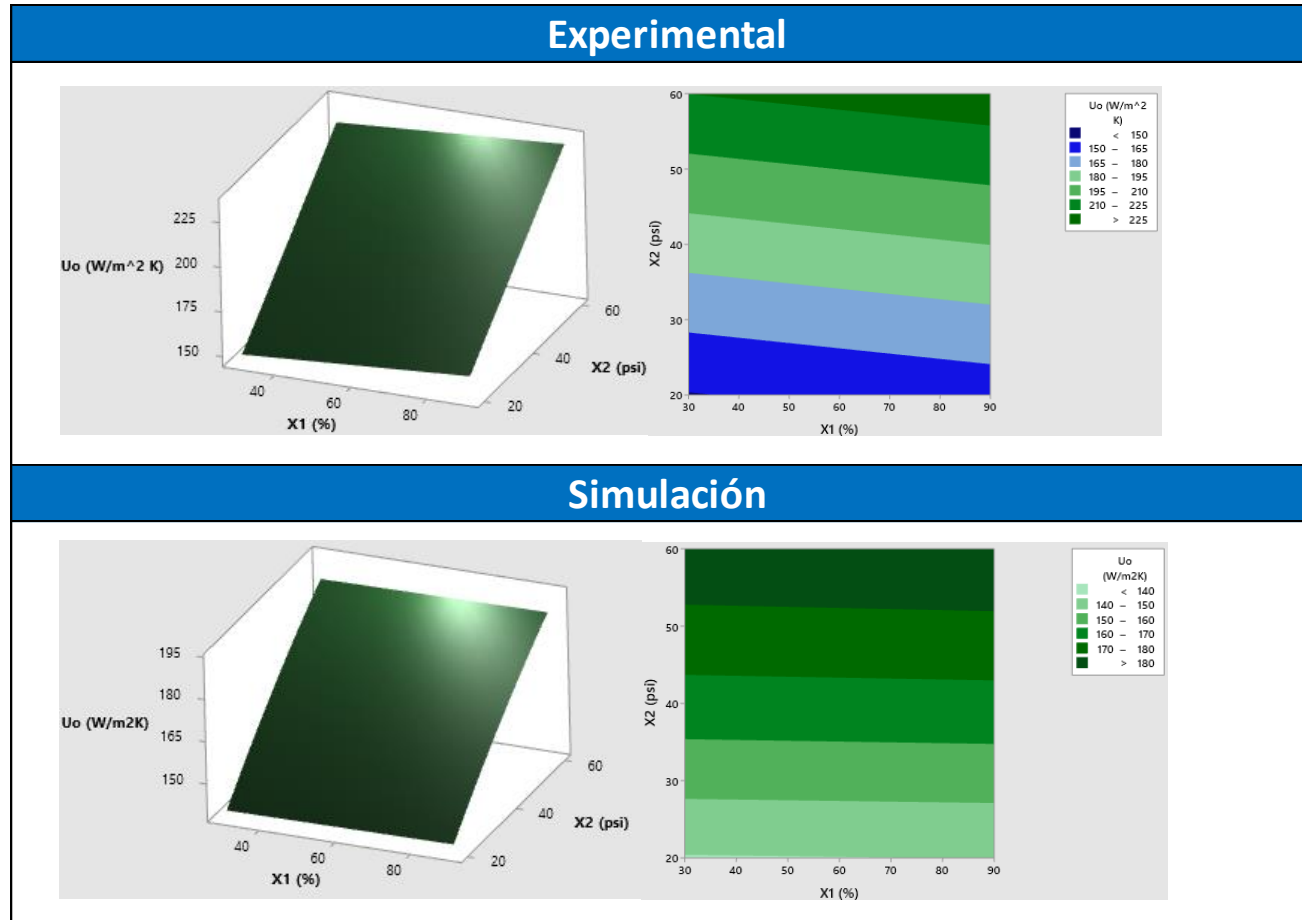
Coeficiente global de transferencia de calor interno U_i (W/m^2K) vs; x_1 (%); x_2 (psi)



ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE GRÁFICAS DATOS EXPERIMENTALES VERSUS SIMULADOS

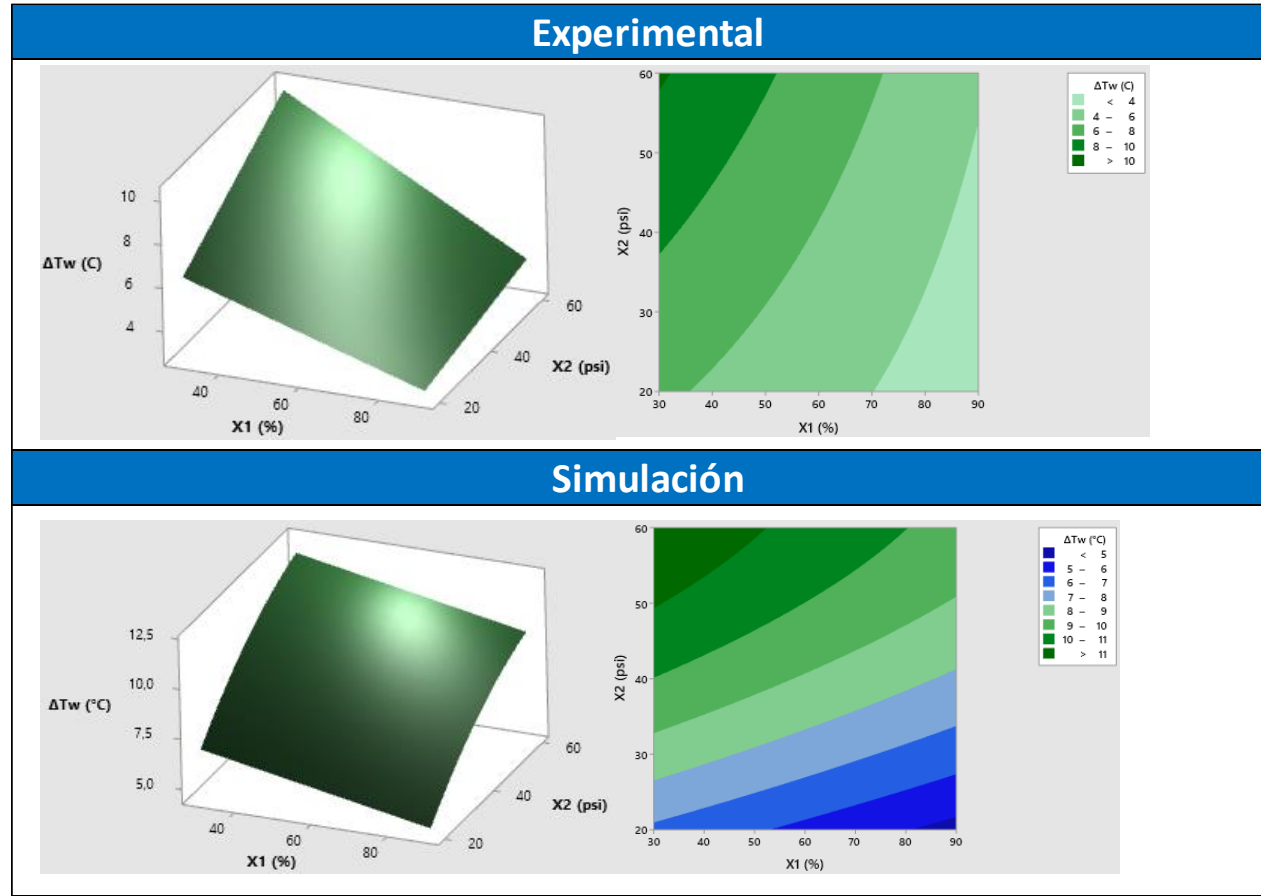
Coeficiente global de transferencia de calor externo U_o (W/m²K) vs; x_1 (%); x_2 (psi)



ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE GRÁFICAS DATOS EXPERIMENTALES VERSUS SIMULADOS

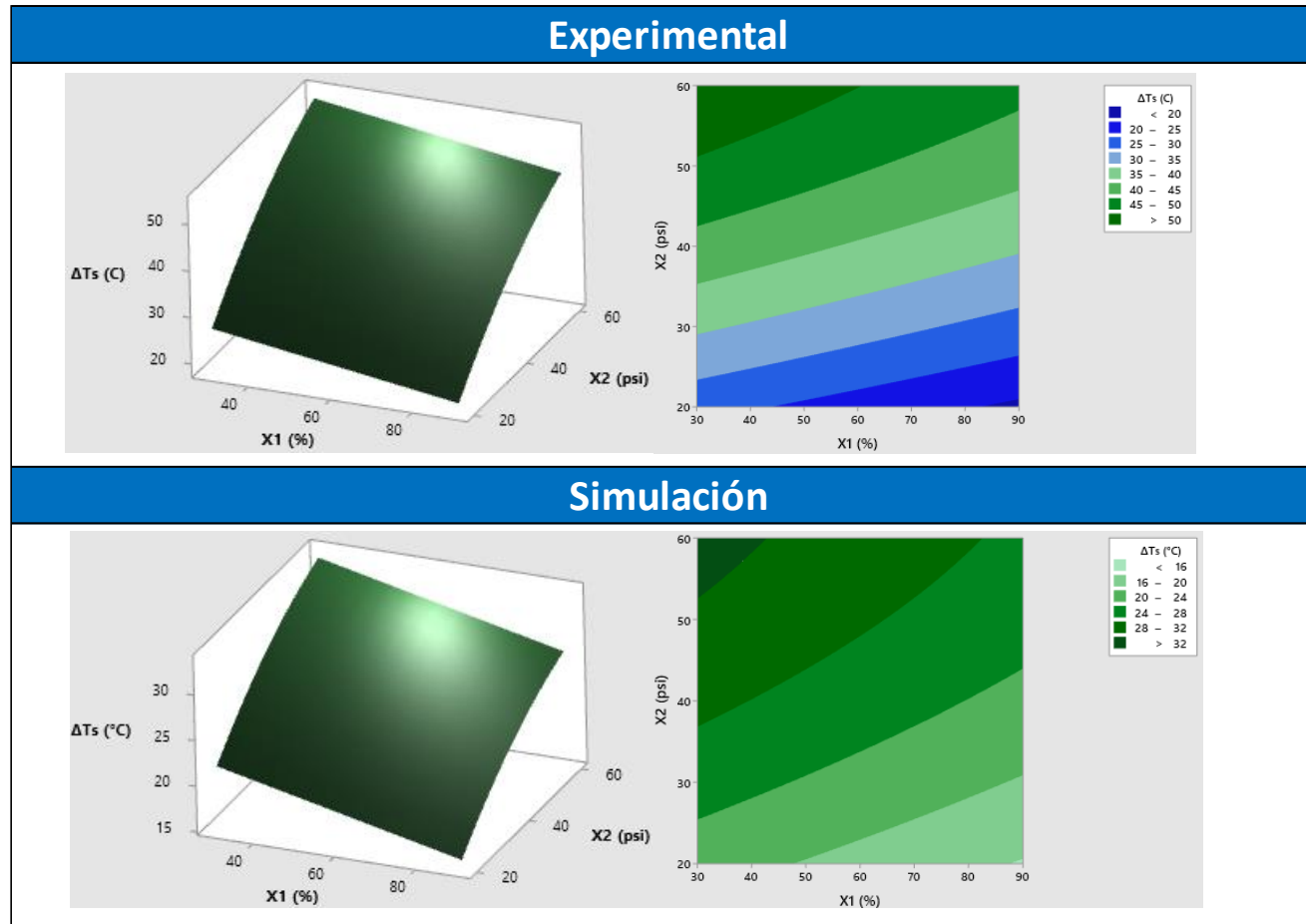
Diferencia de temperatura de agua ΔT_w ($^{\circ}\text{C}$) vs; x_1 (%); x_2 (psi)



ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE GRÁFICAS DATOS EXPERIMENTALES VERSUS SIMULADOS

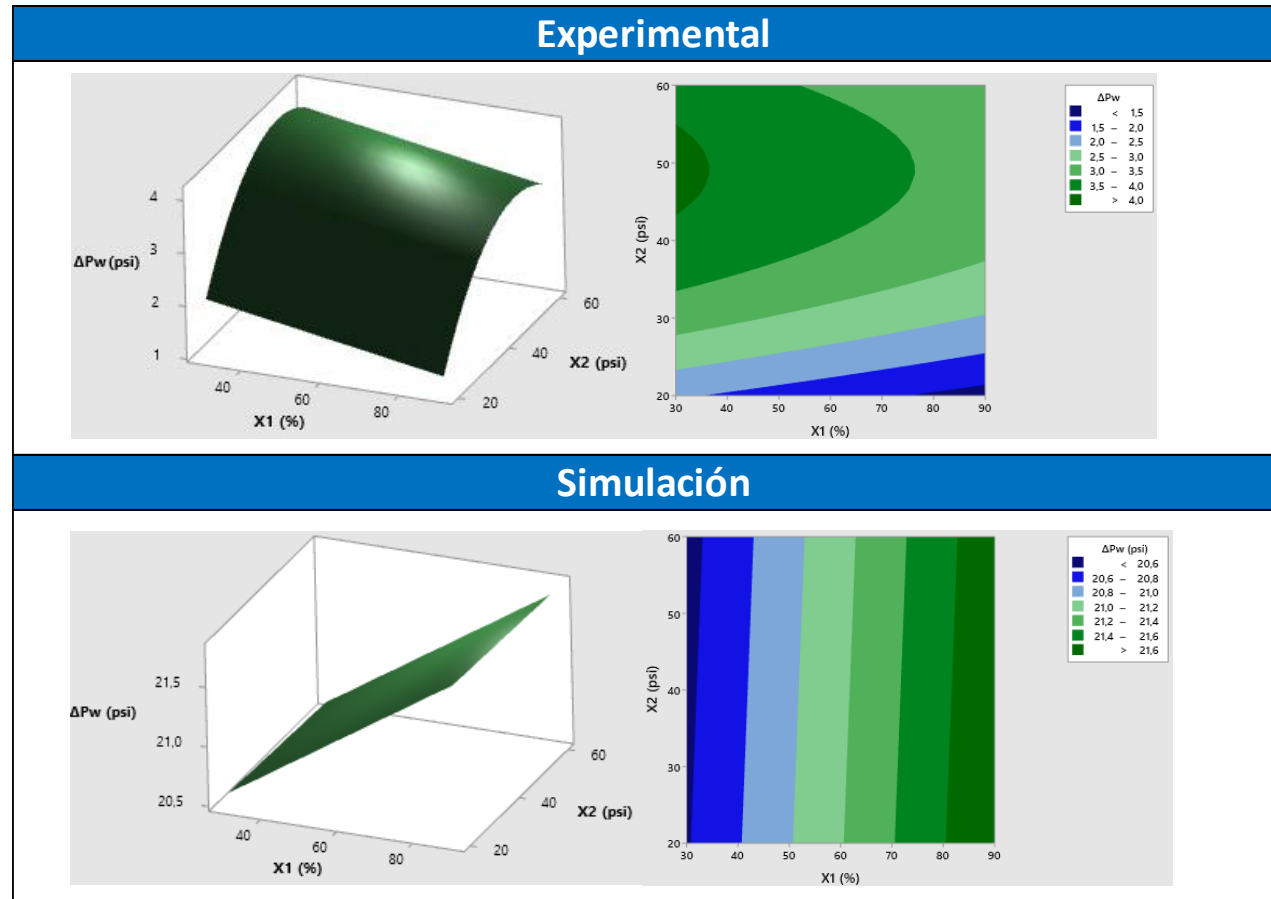
Diferencia de temperatura de vapor ΔT_s ($^{\circ}\text{C}$) vs; x_1 (%); x_2 (psi)



ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE GRÁFICAS DATOS EXPERIMENTALES VERSUS SIMULADOS

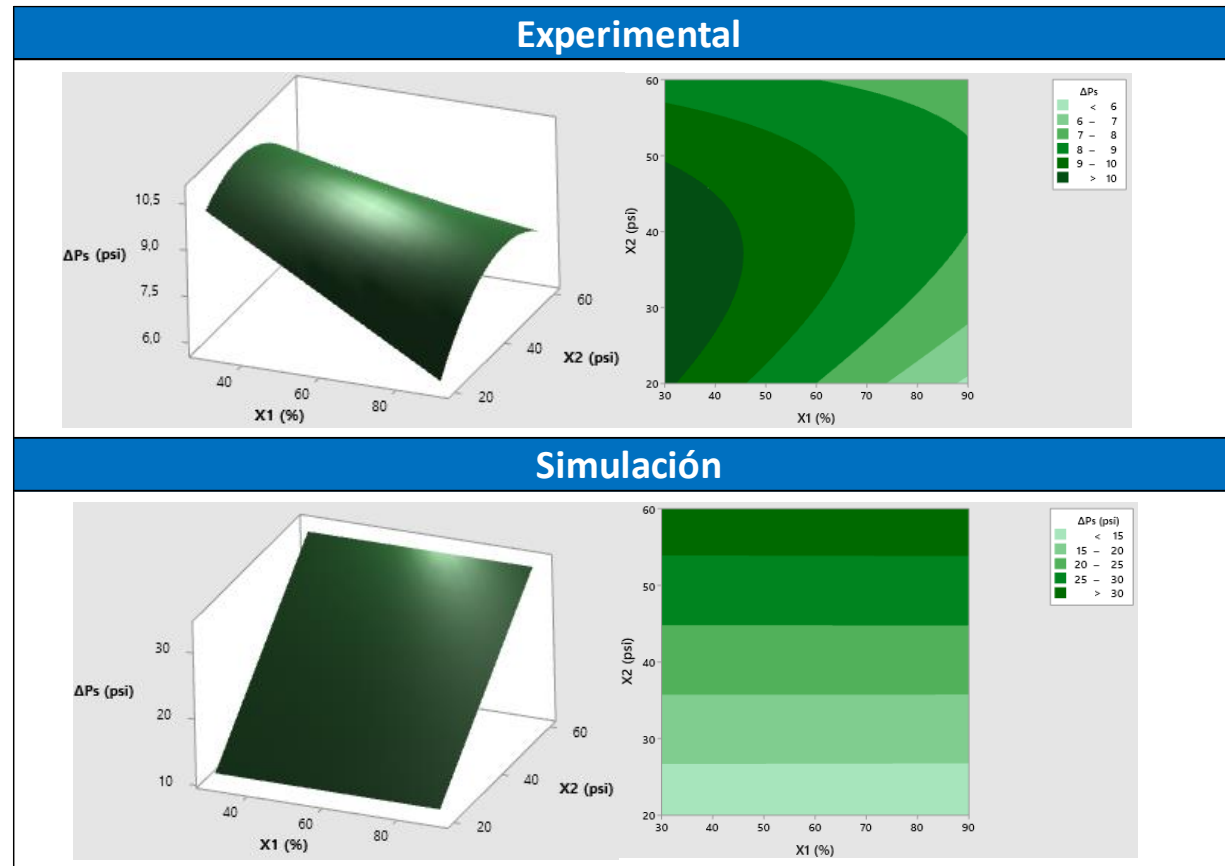
Diferencia de presión de agua ΔP_w (psi) vs; x_1 (%); x_2 (psi)



ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE GRÁFICAS DATOS EXPERIMENTALES VERSUS SIMULADOS

Diferencia de presión de vapor ΔP_s (psi) vs; x_1 (%); x_2 (psi)



CÁLCULO DEL PUNTO ÓPTIMO

Punto óptimo de las variables de respuesta datos experimentales

Variable de respuesta Y	Punto optimo		Valor optimo Y
	x1 (%)	x2 (psi)	
Potencia térmica transferida \dot{Q}	30	60	7869,34 W
Coeficiente global de transferencia de calor interno U_i	90	60	376,822 W/m ² K
Coeficiente global de transferencia de calor externo U_o	90	60	233,11 W/m ² K
Diferencia de temperatura de agua ΔT_w	30	60	10,229 °C
Diferencia de temperatura de vapor ΔT_s	30	60	53,11 °C
Diferencia de presión de agua ΔP_w	30	49	4,0837 psi
Diferencia de presión de vapor ΔP_s	30	34	10,7969 psi

CÁLCULO DEL PUNTO ÓPTIMO

Punto óptimo de las variables de respuesta datos simulados

Variable de respuesta Y	Punto optimo		Valor optimo Y
	x1 (%)	x2 (psi)	
Potencia térmica transferida \dot{Q}	30	60	8932.15 W
Coeficiente global de transferencia de calor interno U_i	90	60	304.325 W/m ²
Coeficiente global de transferencia de calor externo U_o	90	60	188.258 W/m ²
Diferencia de temperatura de agua ΔT_w	30	60	11.805 °C
Diferencia de temperatura de vapor ΔT_s	30	60	33.3 °C
Diferencia de presión de agua ΔP_w	90	20	21.7917 psi
Diferencia de presión de vapor ΔP_s	90	60	33.4217 psi

OPTIMIZACIÓN CONJUNTA

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
ΔP_s (C)	Máximo	5,33	11,33		1	1
ΔP_w (C)	Máximo	1,33	4,00		1	1
ΔT_s (C)	Máximo	18,92	53,11		1	1
ΔT_w (C)	Máximo	2,78	10,57		3	3
U_o (W/m ² K)	Máximo	146,28	229,04		1	1
U_i (W/m ² K)	Máximo	236,46	370,25		2	2
Q (W)	Máximo	2961,57	7852,12		3	3

Optimización conjunta datos experimentales

Solución

	X1 (%)	X2 (psi)	ΔP_s (C) Ajuste	ΔP_w (C) Ajuste	ΔT_s (C) Ajuste	ΔT_w (C) Ajuste	U_o (W/m ² K) Ajuste	U_i (W/m ² K) Ajuste	Q (W) Ajuste
Solución									
1	30	60	8,50001	3,79944	53,9967	10,2290	225,128	363,918	7869,34

Optimización conjunta datos simulados

Solución

	X1 (%)	X2 (psi)	ΔP_s (psi) Ajuste	ΔP_w (psi) Ajuste	ΔT_s (°C) Ajuste	ΔT_w (°C) Ajuste	U_o (W/m ² K) Ajuste	U_i (W/m ² K) Ajuste	Q (W) Ajuste
Solución									
1	35,4545	60	33,3580	20,645	32,7509	11,6102	187,395	302,922	
Solución									
1									8794,87

Conclusiones

- El cálculo de las variables de interés que influyen directamente en la eficiencia del equipo fue satisfactorio, después de un análisis entre la significancia de las variables independientes con cada una de las variables de respuesta, se concluye que el intercambiador de calor ofrece una mayor eficiencia en su funcionamiento al configurar la abertura de la válvula VM-18 al 30 % en la línea de agua y la presión de salida de la válvula reductora VM-20 a 60 psi en la línea de vapor.
- Los resultados del análisis experimental versus el análisis de simulación fueron satisfactorios, no se obtuvieron mayores diferencias en las variables de respuesta, exceptuando las diferencias de presiones de entrada y salida de agua inyectable y vapor industrial en el análisis experimental, esto sucede por varios factores, por ejemplo, los instrumentos indicadores de la presión son analógicos con un tiempo de respuesta relativamente largo y considerando los flujos que se manejan a altas presiones y caudales que no siempre son constantes, las pérdidas de presión no llegan a evidenciarse en sus valores reales como si sucede en la simulación.

Conclusiones

- Este nuevo diseño de intercambiador de calor es relativamente de fácil montaje y puede llegar a ser utilizado como un elemento complementario para el intercambio de calor entre fluidos, sin embargo, no cuenta con la suficiente eficiencia para ser instalado como un equipo principal considerando la alta diferencia de temperatura de vapor que se pierde para obtener una pequeña diferencia de temperatura de calentamiento en el agua inyectable y el tiempo que demora en el intercambio de calor siendo muy poco rentable energéticamente.

Recomendaciones

- Es recomendable configurar la abertura de la válvula VM-18 de la línea de agua inyectable al 30 % (aproximadamente 3 vueltas) y la presión de salida de la válvula reductora VM-20 a 60 psi en la línea de vapor para obtener una mayor eficiencia de los intercambiadores de calor E5.
- Es recomendable encaquetar las superficies exteriores de los intercambiadores de calor para evitar pérdidas energéticas, además, es necesario asegurarse continuamente que las carcasas estén debidamente ajustadas a la tubería sanitaria.
- Es recomendable utilizar un gel conductor térmico entre las superficies internas de las carcasas del intercambiador de calor y la superficie externa de la tubería sanitaria para asegurar que todas las paredes estén en contacto y garanticen la transferencia de calor por conducción evitando pérdidas.

Bibliografía

ANSYS. (2011). *ANSYS FLUENT Theory Guide*. Cannonsburg, United States.

Baró Gadea, E. (2012). *Estudio de la rugosidad superficial mediante fresado (Projecte/Treball Final de Carrera)*. UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Departament d'Enginyeria Mecànica.

Laboratorios LIFE. (2022). *LOOP de agua inyectable de menor volumen*. Quito, Ecuador.

GRACIAS POR SU ATENCIÓN



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA