



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



Modelación de Intercambiador de Calor de Flujo Cruzado

MEC-278: Ingeniería Térmica - 2021

Alumno: Martín Achondo Mercado

Rol: 201860005-9

Profesor: Carlos Rosales

13 de Octubre de 2021

Contents

1	Introducción	2
2	Problema	2
3	Implementación del Código	3
4	Resultados	6
4.1	Caso 1 (Estandar):	6
4.2	Caso 2 (Modificación del Largo de los Tubos):	8
4.2.1	Caso 2.1 (Largo de 5 metros)	8
4.2.2	Caso 2.2 (Largo de 3 metros)	9
4.3	Caso 3 (Modificación del Número de Columnas):	10
4.3.1	Caso 3.1 (70 Columans)	10
4.3.2	Caso 3.2 (130 Columnas)	11
4.4	Caso 4 (Modificación del Número de Filas):	12
4.4.1	Caso 4.1 (15 Filas)	12
4.4.2	Caso 4.2 (45 Filas)	13
4.5	Caso 5 (Modificación de las Dimensiones Manteniendo Área):	14
4.6	Caso Extra	15
5	Conclusiones	17
6	Referencias	17
7	Anexos	18
7.1	Código Completo	18
7.2	Distribución de T1 en eje x	26
7.3	Distribución de T2 a la salida en eje x	30

1 Introducción

Los intercambiadores de calor son ampliamente utilizados en la industria para calentar y enfriar fluidos, tanto gaseosos como líquidos. El diseño y la modelación de estos permite obtener parametros de interés dependiendo de su utilización.

En este trabajo se modelará numéricamente un intercambiador de flujo cruzado mezclado - no mezclado. Con el modelo se podrá predecir las temperaturas de salida de cada uno de los fluidos. Además, permitirá varias ciertos parámetros para mejorar así la transferencia de calor.

2 Problema

Como se dijo anteriormente, en este trabajo se modelará un intercambiador de flujo cruzado mezclado - no mezclado. Fluirán gases por fuera de los tubos (mezclado) y aceite Thermia Oil B por los tubos (no mezclado). Los gases entrarán a 800°C y el aceite a 20°C . Un dibujo esquemático se ve en la siguiente imagen.

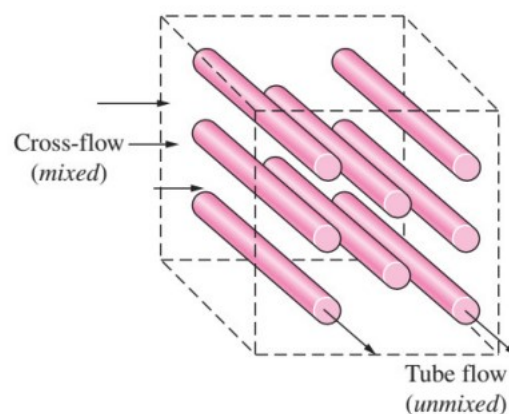


Figure 1: Diagrama del intercambiador a modelar

Para el resto del trabajo se llamará fluido 1 al gas y fluido 2 al aceite.

La nomenclatura que se utilizará es la misma que se usa en el pdf guía. Los parámetros fijos a utilizar en el intercambiador son:

Para los tubos:

- $d_o = 4$ [mm] (Diámetro exterior tubos)
- $d_i = 40.89$ [mm] (Diámetro interior tubos)
- $k_t = 40$ [W/mK] (Conductividad térmica tubos)
- $Z = 81$ [mm] (Separación de los tubos, vertical y horizontal)

Para las aletas:

- $d_e = 79$ [mm] (Diámetro exterior aleta)
- $t = 1$ [mm] (Espesor)
- $k_f = 386$ [W/mK] (Conductividad térmica aletas)
- $\sigma_f = 275$ [aletas/m] (Densidad aletas)

Estos valores se mantendrán constantes al igual que las temperaturas de entrada de los fluidos.

Los valores que se modificarán serán:

- N_f : Número de filas de tubos
- N_c : Número de columnas de tubos
- L_y : Largo de los tubos
- N_y : Nodos para la discretización de los tubos
- \dot{m}_1 : Flujo másico del fluido 1
- \dot{m}_2 : Flujo másico del fluido 2

3 Implementación del Código

El código se hizo siguiendo el pseudo-código que estaba en el pdf. Se creó el loop principal en el cual se itera hasta obtener la temperatura final. En este loop se llaman a funciones que calculen los parámetros necesarios para poder calcular las temperaturas del aceite y el gas.

El código fue diseñado en Python y utiliza las librerías de numpy y matplotlib para su funcionamiento. Este fue adjuntado en el anexo de este documento y también en el archivo .zip entregado. Toda la explicación está comentada en el mismo código. Es importante notar que Python parte los índices desde cero. Por esto, pueden existir diferencias con la numeración del pdf y la implementada en el código.

El código creado, además de crear 3 gráficos que se utilizaron en el análisis de los resultados, guarda las distribuciones de las temperaturas en archivos .csv en una carpeta llamada data. Se entregará esa carpeta con los resultados del caso estándar que se explicará más adelante. De todas formas, se adjuntan las distribuciones en el anexo, ya que se pedían.

En el código se calculan las temperaturas de ambos fluidos, almacenándolas en arrays. T1 será un array de 1 dimensión y T2 de dos dimensiones. La discretización del intercambiador se puede ver en la siguiente imagen:

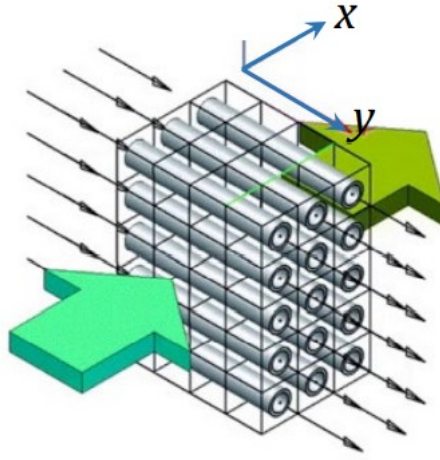


Figure 2: Diagrama del intercambiador a discretizado

Para la dirección x, se discretizará como columnas de tubos.

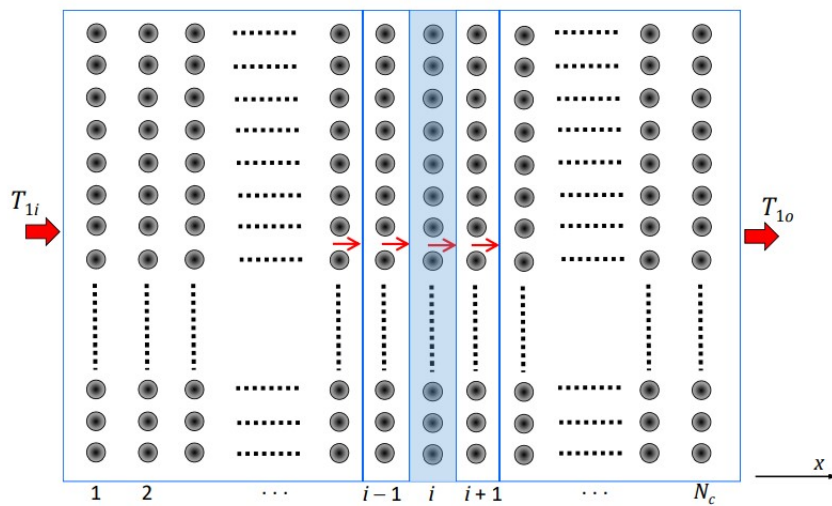


Figure 3: Discretización del intercambiador en dirección x.

Para la dirección y , se discretizará de acuerdo a los nodos a ingresar en el código.

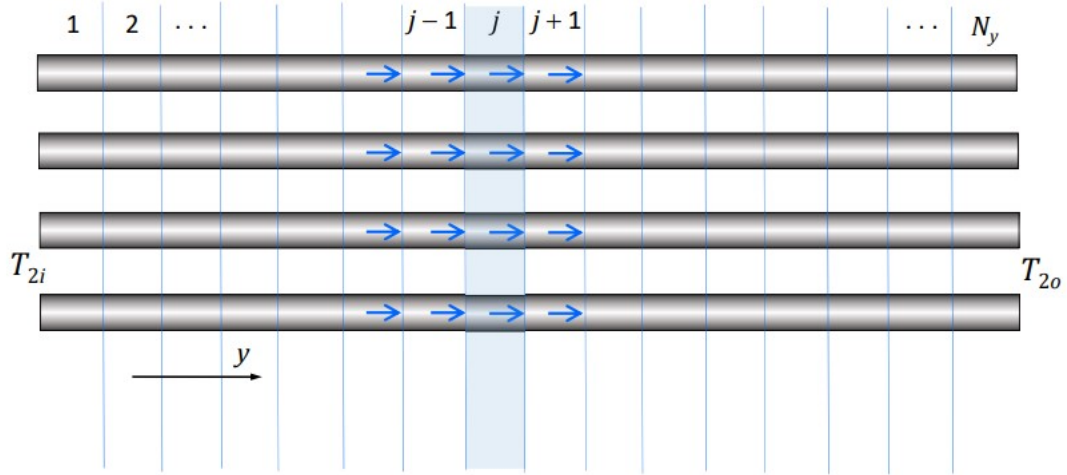


Figure 4: Discretización del intercambiador en dirección y , para la columna de tubos i .

Las ecuaciones a utilizar para calcular las distribuciones de temperatura y el flujo de calor son:

$$T_{2[i,j+1]} = T_{2[i,j]} + \frac{U_{[i,j]} \Delta A_2}{C_{2[i,j]}} (T_{1[i]} - T_{2[i,j]}) \quad (1)$$

$$T_{1[i+1]} = T_{1[i]} + \frac{\Delta A_2}{C_{1[i]}} \sum_{j=1}^{N_y} U_{[i,j]} (T_{1[i]} - T_{2[i,j]}) \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=1}^{N_c} C_{1[i]} (T_{1[i+1]} - T_{1[i]}) \quad (3)$$

4 Resultados

En esta sección se intentó conocer como varía las temperaturas del aceite cambiando las dimensiones del intercambiador de calor, respecto al caso 1 (Estandar). Dado que el propósito es calentar el aceite, se analizará respecto a esto. De todas formas, mientras más temperatura tiene el aceite a la salida, más transferencia de calor existió desde el gas.

4.1 Caso 1 (Estandar):

El primer caso de prueba para el intercambiador fue con los siguientes valores:

- $N_f = 30$
- $N_c = 100$
- $L_y = 4$ [m]
- $N_y = 44$
- $\dot{m}_1 = 1$ [kg/s]
- $\dot{m}_2 = 0.8$ [kg/s]

Se usó una distribución uniforme de flujo másico por los tubos. Con estos valores se tiene un intercambiador de tamaño aproximado:

- Ancho (en x): 8.1 [m]
- Largo (en y): 4 [m]
- Alto (en z): 2.43 [m]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $T_{1o} = 510.7$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 208.3$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 333.3$ [kW] (Flujo calor)

Se nota con este intercambiador, se logró calentar el aceite en 188 [°C], lo cual es bastante razonable. Esto se realizó utilizando el calor proveniente de los gases a 800 [°C]. Para ver las distribuciones de las temperaturas, se realizaron 3 gráficos:

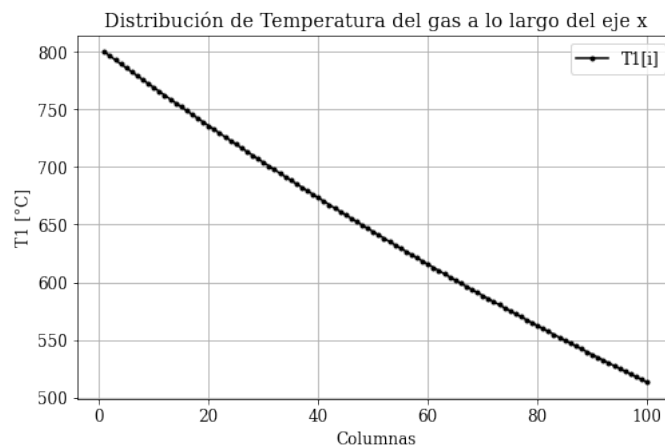


Figure 5: Distribución de temperaturas del gas a lo largo de las columnas (eje x)

Se nota que el gas va disminuyendo su temperatura a medida que pasa las columnas. Esto tiene sentido ya que le va transfiriendo calor al aceite que pasa por los tubos.

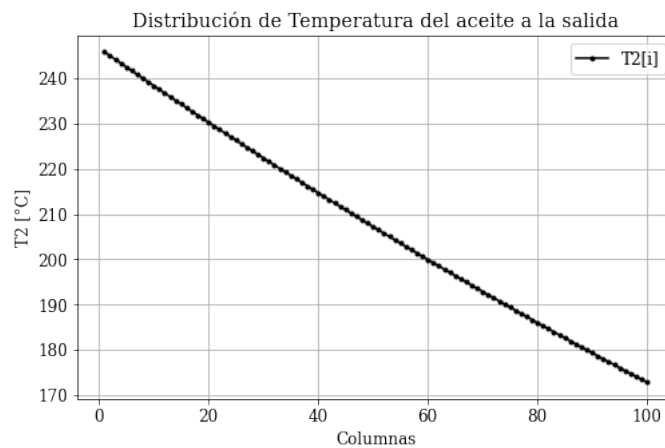


Figure 6: Distribución de temperaturas del aceite a la salida a lo largo de las columnas (eje y)

Para la temperatura del aceite, se nota que en las primeras columnas es la más alta, y va disminuyendo con ellas. Esto se debe a que la diferencia de temperatura entre el aceite y el gas es alta en las primeras columnas y esta va disminuyendo, lo que disminuye el calor transferido.

Distribución de la Temperatura del Aceite a lo Largo del Intercambiador

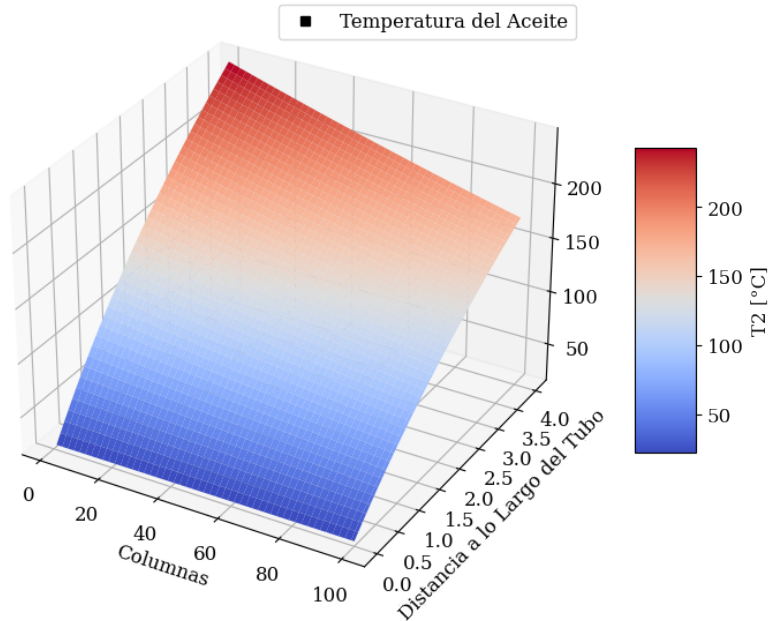


Figure 7: Distribución de temperaturas del aceite en todo el intercambiador (x,y)

Este gráfico se creó para evidenciar el hecho de que la temperatura del aceite en las primeras columnas crece mucho más a medida que se avanza en la longitud del tubo.

4.2 Caso 2 (Modificación del Largo de los Tubos):

Para la modificación del largo, se probó con largos de $L_y = 5$, $L_y = 3$

4.2.1 Caso 2.1 (Largo de 5 metros)

Se anotan todos los parámetros pero el único que se modificó fue el largo.

- $N_f = 30$
- $N_c = 100$
- $L_y = 5$ [m]
- $N_y = 44$
- $\dot{m}_1 = 1$ [kg/s]
- $\dot{m}_2 = 0.8$ [kg/s]

Se usó una distribución uniforme de flujo másico por los tubos. Con estos valores se tiene un intercambiador de tamaño aproximado:

- Ancho (en x): 8.1 [m]
- Largo (en y): 5 [m]
- Alto (en z): 2.43 [m]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $T_{1o} = 469.1$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 230.9$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 379.6$ [kW] (Flujo calor)

Se nota que aumentando el largo, la temperatura del aceite a la salida aumentó (10%). Esto se debe a que existe una mayor área de transferencia de calor, y por lo tanto un mayor flujo de calor.

4.2.2 Caso 2.2 (Largo de 3 metros)

- $N_f = 30$
- $N_c = 100$
- $L_y = 3$ [m]
- $N_y = 44$
- $\dot{m}_1 = 1$ [kg/s]
- $\dot{m}_2 = 0.8$ [kg/s]

Se usó una distribución uniforme de flujo másico por los tubos. Con estos valores se tiene un intercambiador de tamaño aproximado:

- Ancho (en x): 8.1 [m]
- Largo (en y): 3 [m]
- Alto (en z): 2.43 [m]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $T_{1o} = 560.6$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 180.0$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 277.1$ [kW] (Flujo calor)

Se nota que disminuyendo el largo, la temperatura del aceite a la salida disminuyó. Esto se debe a que existe una menor área de transferencia de calor, y por lo tanto un menor flujo de calor.

Para ver el comportamiento respecto al largo, se creó el siguiente gráfico:

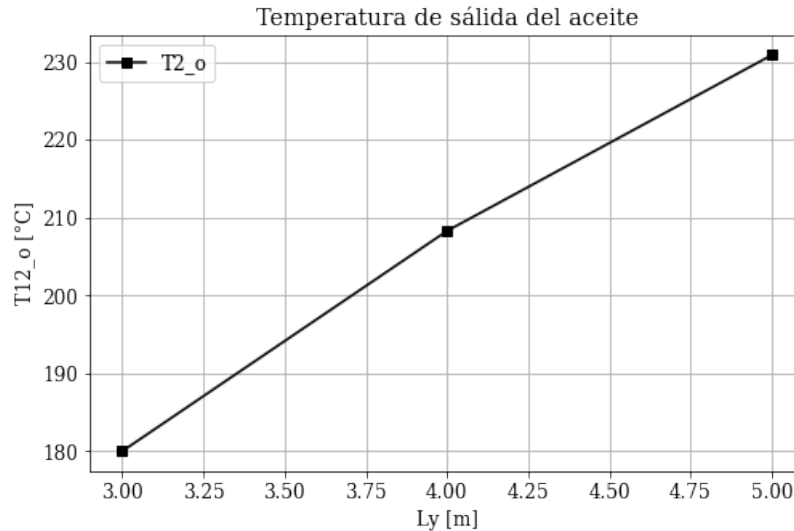


Figure 8: Temperatura del aceite a la salida respecto al largo de los tubos

Como se ve en el gráfico, claramente un aumento en el largo de los tubos aumenta la temperatura de salida del aceite. De todas formas, se piensa que esta curva irá disminuyendo su pendiente a medida que crezca mucho el largo dado que se empieza a alcanzar el equilibrio térmico entre el aceite y el gas.

4.3 Caso 3 (Modificación del Número de Columnas):

Para la modificación del número de columnas, se probó con valores de: $N_c = 70$ y $N_c = 130$. Nota que se estará comparando con el caso 1 (estándar).

4.3.1 Caso 3.1 (70 Columns)

Se tienen los parámetros:

- $N_f = 30$
- $N_c = 70$
- $L_y = 4$ [m]
- $N_y = 44$

- $\dot{m}_1 = 1$ [kg/s]
- $\dot{m}_2 = 0.8$ [kg/s]

Con estos valores se tiene un intercambiador de tamaño aproximado:

- Ancho (en x): 5.67 [m]
- Largo (en y): 4 [m]
- Alto (en z): 2.43 [m]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $T_{1o} = 573.9$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 172.3$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 262.1$ [kW] (Flujo calor)

Disminuyendo el número de columnas claramente disminuye la temperatura de salida del aceite. Esta disminución fue de casi un 18%. Esto es debido a que existe una menor área de transferencia de calor, hay un menor contacto entre ambos fluidos. De todas formas, el Reynolds del fluido 2 aumenta y por tanto el coeficiente de convección, pero parece no contrarrestar.

4.3.2 Caso 3.2 (130 Columnas)

- $N_f = 15$
- $N_c = 130$
- $L_y = 4$ [m]
- $N_y = 44$
- $\dot{m}_1 = 1$ [kg/s]
- $\dot{m}_2 = 0.8$ [kg/s]

Con estos valores se tiene un intercambiador de tamaño aproximado:

- Ancho (en x): 8.1 [m]
- Largo (en y): 4 [m]
- Alto (en z): 3.64 [m]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $T_{1o} = 459.5$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 236.0$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 390.2$ [kW] (Flujo calor)

Claramente, para este caso ocurre lo inverso de lo explicado en el anterior. Ahora al existir mayor área por las cantidades de columnas, mayor la temperatura del aceite (14%). De todas formas, por términos de costos, no se puede aumentar indefinidamente el número de columnas.

Esto en un gráfico se ve evidenciado de la siguiente manera:

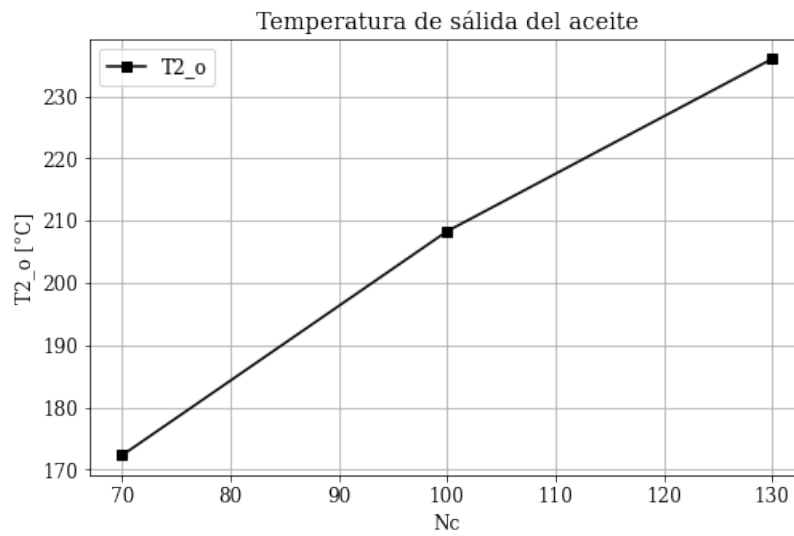


Figure 9: Temperatura del aceite a la salida respecto al número de filas

Claramente se refleja que a mayor número de columnas, mayor transferencia de calor.

4.4 Caso 4 (Modificación del Número de Filas):

Para la modificación del número de filas, se probó con valores de: $N_f = 15$ y $N_f = 45$. Nota que se estará comparando con el caso 1 (estándar).

4.4.1 Caso 4.1 (15 Filas)

Se tienen los siguientes parámetros:

- $N_f = 15$
- $N_c = 100$
- $L_y = 4$ [m]

- $N_y = 44$
- $\dot{m}_1 = 1$ [kg/s]
- $\dot{m}_2 = 0.8$ [kg/s]

Con estos valores se tiene un intercambiador de tamaño aproximado:

- Ancho (en x): 8.1 [m]
- Largo (en y): 4 [m]
- Alto (en z): 1.22 [m]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $T_{1o} = 506.1$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 210.8$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 338.4$ [kW] (Flujo calor)

Se nota que disminuyendo el número de filas, aumenta la temperatura de salida del aceite. De todas formas aumento en 2 [°C] (1.2%). La verdad es bastante poco lo que se aumenta. Esto se puede deber a diversos factores. El primero es que el fluido 1 tiene un menor área para pasar por el intercambiador, por lo que su velocidad aumenta. Esto provoca Reynolds y Nusselts más altos y por tanto, un mayor coeficiente de convección. De todas formas, esta medida reduce el área de transferencia de calor, por esto debe ser el aumento tan bajo.

4.4.2 Caso 3.2 (45 Filas)

- $N_f = 45$
- $N_c = 100$
- $L_y = 4$ [m]
- $N_y = 44$
- $\dot{m}_1 = 1$ [kg/s]
- $\dot{m}_2 = 0.8$ [kg/s]

Con estos valores se tiene un intercambiador de tamaño aproximado:

- Ancho (en x): 8.1 [m]
- Largo (en y): 4 [m]

- Alto (en z): 3.64 [m]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $T_{1o} = 514.0$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 206.4$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 329.5$ [kW] (Flujo calor)

Claramente, para este caso ocurre lo inverso de lo explicado en el anterior. Ahora al existir mayor área, las velocidades son más bajas y por tanto, menor coeficiente de convección. De la misma forma, existe un mayor área de transferencia, pero no es suficiente.

Esto en un gráfico se ve evidenciado de la siguiente manera:

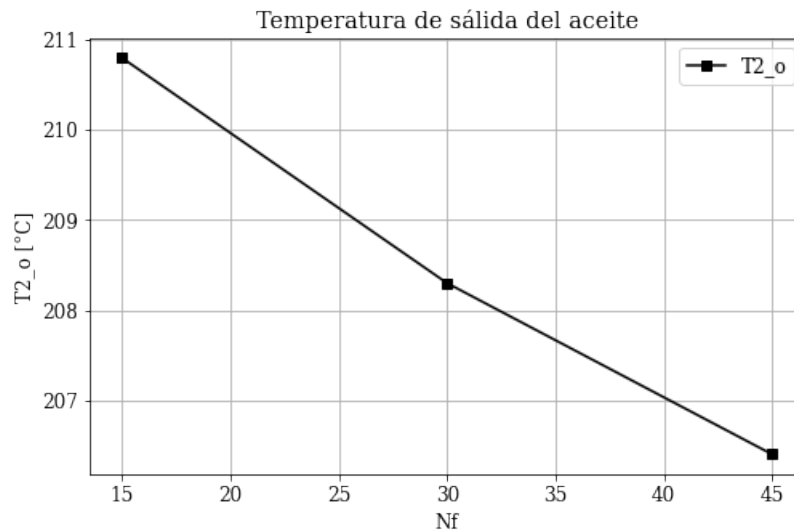


Figure 10: Temperatura del aceite a la salida respecto al número de filas

Lo importante que se nota es que un intercambiador más grande no necesariamente es lo más óptimo, en términos de filas.

4.5 Caso 5 (Modificación de las Dimensiones Manteniendo Área):

Dado que se encontró la relación de la transferencia de calor respecto a las columnas, filas y largo, se intentará encontrar una disposición que mantenga el área de transferencia de calor respecto al caso estándar pero mejore la transferencia de calor. Los parámetros quedan de la siguiente manera:

- $N_f = 25$

- $N_c = 110$
- $L_y = 4.363$ [m]
- $N_y = 44$
- $\dot{m}_1 = 1$ [kg/s]
- $\dot{m}_2 = 0.8$ [kg/s]

Con estos valores se tiene un intercambiador de tamaño aproximado:

- Ancho (en x): 8.91 [m]
- Largo (en y): 4.36 [m]
- Alto (en z): 2.02 [m]

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- $T_{1o} = 474.6$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 227.9$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 373.5$ [kW] (Flujo calor)

Se nota un aumento de casi el 10% en la temperatura de salida del aceite. Esto se debe a todos los factores explicados anteriormente. El coeficiente de convección del gas es mayor dada la reducción en su área de paso y los fluidos están más "recorrido" en contacto ya que tanto la dirección x como la y se aumentaron. Esto provoca que la transferencia de calor sea mayor.

4.6 Caso Extra

Se probará un intercambiador con los mismos parámetros que el caso estándar, pero se modificará la distribución de flujo másico a través de las columnas. Se probará con una distribución donde el flujo es máximo en el centro y mínimo en los extremos:

Se obtuvieron los siguientes resultados:

- $T_{1o} = 512.0$ [°C] (Temperatura salida gas)
- $T_{2o} = 208.1$ [°C] (Temperatura salida aceite)
- $\dot{Q} = 331.8$ [kW] (Flujo calor)

Se nota que la variación de la temperatura del aceite fue casi nula.

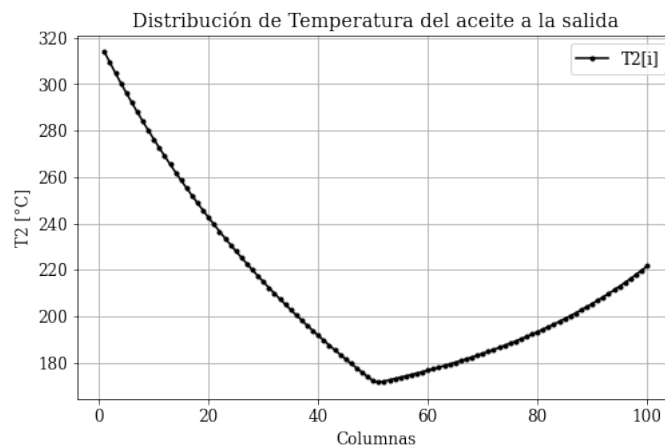


Figure 11: Distribución de temperaturas del aceite a la salida a lo largo de las columnas

Distribución de la Temperatura del Aceite a lo Largo del Intercambiador

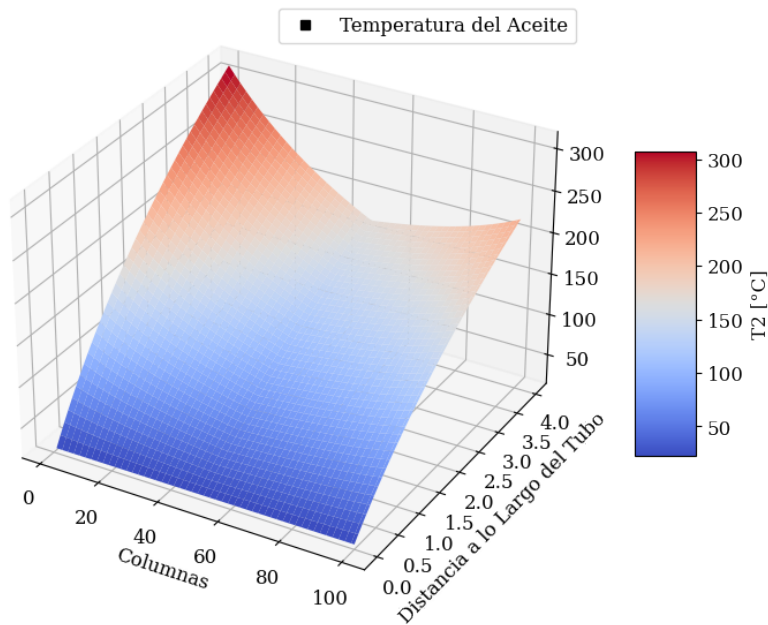


Figure 12: Distribución de temperaturas del aceite en todo el intercambiador (x,y)

Claramente este diseño no es óptimo. Estos gráficos muestran que dado que en las primeras columnas el flujo másico es tan pequeño, la capacidad térmica es muy baja. Esto provoca que el aceite se caliente mucho. Esto puede traer problemas dado que el aceite tiene una temperatura máxima de trabajo. Por esta razón, se concluye que lo óptimo es un flujo uniforme.

5 Conclusiones

Como se evidenció a lo largo del trabajo, la transferencia total de calor en un intercambiador depende de muchos factores, como por ejemplo: los parámetros del flujo, los tipos de materiales, las dimensiones, etc. Lo ideal es bajo las consideraciones de dimensiones y costos, diseñar el intercambiador que maximize la transferencia de calor. Además, en este trabajo se evidencia la importancia de los métodos numéricos para aplicaciones ingenieriles.

Este trabajo se puede mejorar creando distribuciones de temperaturas en el eje z , es decir, en una columna de fluido. Esto trae la gran desventaja que las arrays aumentarán de dimensión, pero el resultado será más exacto. En un futuro intentaré crear un código que use mi función para calcular el calor transferido en el intercambiador y que la maximize bajo restricciones de dimensiones y materiales. Sería como un código de programación lineal.

6 Referencias

- CARLOS ROSALES (2021) *Complementos al Análisis Térmico de Intercambiadores de Calor*
- YUNUS A. ÇENGEL (2007) *Transferencia de Calor y Masa*

7 Anexos

7.1 Código Completo

```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 import os
3 import csv
4 import numpy as np
5 import pandas as pd
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
8 import matplotlib as mpl
9 from matplotlib import rcParams
10 rcParams["figure.figsize"] = (8,5)
11 rcParams['font.family'] = 'serif'
12 rcParams['font.size'] = 12
13
14 #propiedades de los tubos
15 def propiedades_tubos():
16     kt = 40
17     do = 48.26
18     di = 40.89
19     do *= 10**(-3)
20     di *= 10**(-3)
21     ro = do/2
22     ri = di/2
23     return kt,do,di,ro,ri
24
25 #propiedades de las aletas
26 def propiedades_aletas(Ly):
27     kf = 386
28     de = 79
29     t = 1
30     sigmaf = 275
31     de *= 10**(-3)
32     t *= 10**(-3)
33     re = de/2
34     N_aletas = sigmaf*Ly
35     return kf,de,t,sigmaf,re,N_aletas
36
37
38 #funcion para calcular la eficiencia de las aletas
39 def calcular_etaf(h1,Ly,N_aletas,re,ro,t,kf):
40     r_pp = re/ro
41     Le = re - ro + t/2
42     m_pp = np.sqrt(2*h1/(kf*t))
43     if r_pp<=2:
44         b = 0.9107 + 0.0893*r_pp
45     else:
```

```

46         b = 0.9706 + 0.17125*np.log(r_pp)
47     n_pp = np.exp(0.13*m_pp*Le-1.3863)
48     phi_pp = m_pp*Le*(r_pp**n_pp)
49     if phi_pp <= 0.6 + 2.257*r_pp**(-0.445): #Se calcula eta_0
50         eta_0 = np.tanh(phi_pp)/phi_pp
51     else:
52         eta_0 = r_pp**(-0.246)*(m_pp*Le)**(-b)
53     Ab = 2*np.pi*ro*(Ly - t*N_aletas)
54     A0 = np.pi*re**2-np.pi*ro**2 + 2*np.pi*re*t
55     eta_f = (Ab + eta_0*N_aletas*A0)/(Ab + N_aletas*A0) #Se calcula eta_f
56     return eta_f
57
58 #-----
59
60 #Propiedades gas
61
62 def cp_gas(T):
63     a = 1.0147 + 3.3859*10**(-4)*T - 1.6631*10**(-6)*(T**2) + 3.5452*10**(-9)
64     b = - 2.8851*10**(-12)*T**4 + 8.1731*10**(-16)*T**5
65     return (a+b)*10**3
66
67 def viscosidad_gas(T):
68     a = 1.751*10**(-6) + 6.4458*10**(-8)*T - 4.1435*10**(-11)*T**2
69     b = 1.8385*10**(-14)*T**3 - 3.2051*10**(-18)*T**4
70     return a+b
71
72 def conductividad_gas(T):
73     a = 1.9955*10**(-4) + 9.9744*10**(-5)*T - 4.8142*10**(-8)*T**2
74     b = 1.614*10**(-11)*T**3 - 3.176*10**(-15)*T**4
75     return a+b
76
77 def densidad_gas(T):
78     P = 120
79     R = 0.297
80     return P/(R*T)
81
82 def Pr_gas(T):
83     return cp_gas(T)*viscosidad_gas(T)/conductividad_gas(T)
84
85 # Funcion para calcular h1
86 def calcular_h1(m1,rho1,miu1,Nf,Z,Ly,sigmaf,de,do,t,k1,Pr1):
87     u_max = m1/(rho1*Ly*(Nf*(Z-do) - sigmaf*(de-do)*t))
88     Re = rho1*u_max*do/miu1 #Reynolds
89     if 0<= Re and Re < 10**2:
90         C = 0.9
91         alpha = 0.4
92         beta = 0.36
93     elif 10**2 <= Re and Re < 10**3:

```

```

94         C = 0.52
95         alpha = 0.5
96         beta = 0.36
97     elif 10**3 <= Re and Re < 2*10**5:
98         C = 0.27
99         alpha = 0.63
100        beta = 0.36
101     elif 2*10**5 <= Re and Re < 2*10**6:
102         C = 0.033
103         alpha = 0.8
104         beta = 0.4
105     else:
106         print(f'Fuera de rango {Re}')
107
108     Nu = C*Re**alpha*Pr1**beta #Nusselt
109     h1 = k1*Nu/do #se calcula h1
110     return h1
111
112 #-----
113
114 # Propiedades del aceite
115 def cp_oil(T):
116     return (0.81554 + 0.00364*T)*10**3
117
118 def densidad_oil(T):
119     return 1040.3 - 0.60477*T
120
121 def viscosidad_oil(T):
122     a = 81.541 - 0.61584*T + 1.7943*10**(-3)*T**2
123     b = -2.3678*10**(-6)*T**3 + 1.1763*10**(-9)*T**4
124     return np.exp(a+b)*10**(-3)
125
126 def conductividad_oil(T):
127     a = -7.5722*10**(-2) + 2.5952*10**(-3)*T - 1.2033*10**(-5)*T**2
128     b = 2.653*10**(-8)*T**3 - 2.8663*10**(-11)*T**4 + 1.2174*10**(-14)*T**5
129     return a+b
130
131 def Pr_oil(T):
132     return cp_oil(T)*viscosidad_oil(T)/conductividad_oil(T)
133
134 #-----
135
136 # Funcion para h2
137 def h2_ij(i,j,m2,di,miu2,T2,Nf):
138     Re = 4*m2[i]/(Nf*np.pi*di*miu2) #Reynolds
139     if Re > 3000 and Re < 5*10**6: #Ver si es turbulento
140         f = 0.00512 + 0.4572*Re**(-0.311)
141         Nu = ((f/8)*(Re-1000)*Pr_oil(T2[i,j]))/(1+12.7*(f/8)**0.5*(Pr_oil(T2[i,j])

```

```

142
143     else: #Si es laminar
144         Nu = 4.36
145         h2 = conductividad_oil(T2[i,j])*Nu/di #Se calcula h2
146         return h2
147
148 #-----
149
150 # Funcion para calcular constantes
151 def calcular_constantes(Ly,Ny,N_aletas,ro,re,ri,t,kt):
152     dy = Ly/Ny
153     n = N_aletas/Ny
154     dA1b = 2*np.pi*ro*(dy-n*t)
155     dA1f = 2*np.pi*n*(re**2-ro**2+re*t)
156     dA1 = dA1b + dA1f
157     dA2 = 2*np.pi*ri*dy
158     Rw = np.log(ro/ri)/(2*np.pi*kt*dy)
159     return dy,dA1,dA2,Rw
160
161 # Funcion para calcular U_ij
162 def calcular_Uij(h1,h2,eta_f,Rw,dA1,dA2):
163     U = (dA2/(h1*eta_f*dA1) + dA2*Rw + 1/h2)**(-1)
164     return U
165
166 #-----
167
168 # Funcion para crear los 3 graficos
169 def graficar(T1,T2,Nc,Ny,Ly):
170
171     #grafico T1
172     x = np.linspace(1,Nc,Nc)
173     plt.plot(x,T1[0:Nc],c='k', ls='--', marker='.', label="T1[i]")
174     plt.title("Distribucion de Temperatura del gas a lo largo del eje x")
175     plt.ylabel("T1 [C]")
176     plt.xlabel("Columnas")
177     plt.legend(loc="best")
178     plt.grid()
179     plt.show()
180
181     #grafico T2 salida
182     x = np.linspace(1,Nc,Nc)
183     plt.plot(x,T2[:,Ny],c='k', ls='--', marker='.', label="T2[i]")
184     plt.title("Distribucion de Temperatura del aceite a la salida")
185     plt.ylabel("T2 [C]")
186     plt.xlabel("Columnas")
187     plt.legend(loc="best")
188     plt.grid()
189     plt.show()

```

```

190
191     #grafico T2 completo
192     fig = plt.figure(figsize=(11,7), dpi=100)
193     ax = fig.gca(projection='3d')
194     y = np.linspace(1,Nc,Nc)
195     x = np.linspace(0,Ly,Ny+1)
196     X,Y = np.meshgrid(x,y)
197     surf = ax.plot_surface(Y,X,T2, cmap='coolwarm');
198     fig.colorbar(surf, shrink=0.5, aspect=5, label="T2 [C]")
199     plt.title("Distribucion de la Temperatura del Aceite a lo Largo del Inter
200     plt.ylabel("Distancia a lo Largo del Tubo")
201     plt.xlabel("Columnas")
202     fake2Dline = mpl.lines.Line2D([0],[0], linestyle="none", c='k', marker =
203     ax.legend([fake2Dline], ['Temperatura del Aceite'], numpoints = 1)
204     plt.show()
205
206
207 # Funcion para guardar como csv
208 def save_csv(T1,T2,Ny):
209     mydir = os.path.join(os.getcwd(),"data")
210     check_folder = os.path.isdir(mydir)
211     if not check_folder:
212         os.makedirs(mydir)
213     path_T1 = os.path.join(mydir,'T1.csv')
214     path_T2_ex = os.path.join(mydir,'T2_exit.csv')
215     path_T2_com = os.path.join(mydir,'T2_complete.csv')
216     df1 = pd.DataFrame(T1)
217     df1.to_csv(path_T1,header=None)
218     df2 = pd.DataFrame(T2[:,Ny])
219     df2.to_csv(path_T2_ex,header=None)
220     df2 = pd.DataFrame(T2)
221     df2.to_csv(path_T2_com)
222
223
224 # Funcion para pedir parametros a usuario
225 def pedir_parametros():
226     print("Ingresar parametros para intercambiador de calor: ")
227     Nf = input("Numero de filas de tubos: ")
228     Nc = input("Numero de columnas de tubos: ")
229     Ly = input("Largo de tubos [m]: ")
230     Z = input("Separacion vertical de tubos [mm]: ")
231     Ny = input("Elementos discretizacion longitudinal: ")
232     m1 = input("Flujo masico de gas [kg/s]: ")
233     m2 = input("Flujo masico de aceite [kg/s]: ")
234     print("Distribucion de flujo masico")
235     print("0: uniforme, 1: triangular, 2: creciente, 3: decreciente")
236     dis = input("Seleccion: ")
237     return (Nf,Nc,Ly,float(Z)*10**(-3),Ny,m1,m2,dis)

```

```

238
239 #Con esta funcion es mas rapido probar valores que con los inputs
240 #def pedir_parametros():
241 #     Nf = 25
242 #     Nc = 110
243 #     Ly = 4.363
244 #     Z = 81
245 #     Ny = 44
246 #     m1 = 1
247 #     m2 = 0.8
248 #     dis = 0
249 #     return (Nf,Nc,Ly,Z*10**(-3),Ny,m1,m2,dis)
250
251 #-----
252
253
254 #Codigo principal
255 def main():
256     T1_i = 800+273.15 # Temperatura inicial del gas
257     T1_o_exit = T1_i - 150 # Se fija de esta manera la suposicion a la salida
258     T1_m = (T1_i + T1_o_exit)/2
259
260     T2_i = 20+273.15 # Temperatura inicial del aceite
261
262     #-----
263
264     Nf,Nc,Ly,Z,Ny,m1,m2,dis = map(float,pedir_parametros())# Se piden los par
265     Nf,Nc,Ny,dis = int(Nf),int(Nc),int(Ny),int(dis)
266     kt,do,di,ro,ri = propiedades_tubos() # Parametros del tubo
267     kf,de,t,sigmaf,re,N_aletas = propiedades_aletas(Ly) # Parametros de aleta
268     dy,dA1,dA2,Rw = calcular_constantes(Ly,Ny,N_aletas,ro,re,ri,t,kt) # Calcu
269
270     #-----
271
272
273     T1 = np.zeros(Nc+1) # Se inicializa array T1
274     T1[0] = T1_i
275     T1[Nc] = T1_o_exit
276
277     # Se crea la distribucion del flujo masico 2
278     if dis == 0:
279         m2 = np.full(Nc,m2/Nc)
280     elif dis ==1:
281         m2x1 = np.linspace(1,2,Nc//2)
282         m2x2 = np.linspace(2,1,Nc//2)
283         if Nc%2 != 0:
284             m2x = np.concatenate((m2x1,np.array([2+2/Nc]),m2x2))
285         else:

```



```

286         m2x = np.concatenate((m2x1,m2x2))
287         m2 = m2x*m2/np.sum(m2x)
288     elif dis == 2:
289         m2x = np.linspace(1,2,Nc)
290         m2 = m2x*m2/np.sum(m2x)
291     elif dis == 3:
292         m2x = np.linspace(2,1,Nc)
293         m2 = m2x*m2/np.sum(m2x)
294
295     T2 = np.zeros((Nc,Ny+1)) # Se inicializa array T2
296     T2[:,0] = np.full(Nc,T2_i)
297
298     #-----
299
300
301     n = 0
302     error = 0.01 # Error en T1_o
303     e = error + 1
304
305
306     while e > error: # Loop principal
307         n += 1 # Numero de iteraciones
308         T1_o = T1_o_exit
309         T1_m = (T1_i + T1_o)/2
310         for i in range(Nc):
311             cp1 = cp_gas(T1[i]) # Se calculan las propiedades del gas
312             rho1 = densidad_gas(T1_m)
313             k1 = conductividad_gas(T1_m)
314             miu1 = viscosidad_gas(T1_m)
315             Pr1 = Pr_gas(T1_m)
316             h1 = calcular_h1(m1,rho1,miu1,Nf,Z,Ly,sigmaf,de,do,t,k1,Pr1)
317         # Coeficiente de conveccion
318         eta_f = calcular_etaf(h1,Ly,N_aletas,re,ro,t,kf) # Eficiencia de
319
320         S0 = 0 # Se aprovecha de almacenar una suma aqui para no repetir
321         for j in range(Ny):
322             cp2 = cp_oil(T2[i,j]) # Se calculan propiedades del aceite
323             miu2 = viscosidad_oil(T2[i,j])
324             h2 = h2_ij(i,j,m2,di,miu2,T2,Nf) # Coeficiente de conveccion
325             U_ij = calcular_Uij(h1,h2,eta_f,Rw,dA1,dA2) # Coeficiente U
326             T2[i,j+1] = T2[i,j] + U_ij*dA2/(cp2*m2[i])*(T1[i]-T2[i,j]) #
327             if T2[i,j+1] > 340 + 273.15:
328                 print(f'Se supero la temperatura maxima del aceite, T2={T2[i,j+1]}')
329
330             S0 += U_ij*(T1[i]-T2[i,j]) # La suma que se hablo (para calculo de T1)
331             T1[i+1] = T1[i] - dA2/(cp1*m1)*S0 # Se calcula T1 en la siguiente iteracion
332         T1_o_exit = T1[Nc]
333         e = np.abs(T1_o - T1_o_exit) # Se verifica error

```

```

333
334     T1_o = T1_o_exit
335
336     #-----
337
338     # Se calcula T2_o
339     S1 = 0
340     S2 = 0
341     for i in range(Nc):
342         S1 += m2[i]*cp_oil(T2[i,Ny])*T2[i,Ny]
343         S2 += m2[i]*cp_oil(T2[i,Ny])
344     T2_o = S1/S2
345
346     #-----
347
348     #Se calcula el flujo de calor
349     Q = 0
350     for i in range(Nc):
351         Q += m1*cp_gas(T1[i])*(np.abs(T1[i+1]-T1[i]))
352
353     Q = np.abs(Q)
354     #-----
355
356     T1 -= 273.15
357     T2 -= 273.15
358     T1_o -= 273.15
359     T2_o -= 273.15
360
361     print("")
362     print("-----")
363     print("Tamano del Intercambiador:")
364     print(f'Alto: {np.round(Z*Nf, decimals=2)} [m]')
365     print(f'Ancho: {np.round(Z*Nc, decimals=2)} [m]')
366     print(f'Largo: {np.round(Ly, decimals=2)} [m]')
367     print("-----")
368     print("Resultados:")
369     print(f'Numero de iteraciones {n}')
370     print(f'Temperatura de salida del gas: {np.round(T1_o, decimals=1)} [C]')
371     print(f'Temperatura de salida del aceite: {np.round(T2_o, decimals=1)} [C]')
372     print(f'Flujo de calor total transferido: {np.round(Q/1000, decimals=1)} [kW]')
373
374     graficar(T1,T2,Nc,Ny,Ly) #Se grafican resultados
375
376     save_csv(np.round(T1,decimals=1),np.round(T2,decimals=1),Ny) #Se guardan
377
378
379 if __name__ == '__main__':
380     main()

```

7.2 Distribución de T1 en eje x

Columna	T1 [°C]
0	800.0
1	796.50
2	793.00
3	789.60
4	786.10
5	782.70
6	779.30
7	775.80
8	772.40
9	769.10
10	765.70
11	762.30
12	759.00
13	755.60
14	752.30
15	749.00
16	745.70
17	742.40
18	739.20
19	735.90
20	732.70
21	729.40
22	726.20
23	723.00
24	719.80
25	716.60
26	713.50
27	710.30
28	707.20
29	704.00
30	700.90
31	697.80

Columnna	T1 [°C]
32	694.70
33	691.60
34	688.60
35	685.50
36	682.40
37	679.40
38	676.40
39	673.40
40	670.40
41	667.40
42	664.40
43	661.40
44	658.50
45	655.50
46	652.60
47	649.70
48	646.80
49	643.90
50	641.00
51	638.10
52	635.30
53	632.40
54	629.60
55	626.80
56	623.90
57	621.10
58	618.40
59	615.60
60	612.80
61	610.00
62	607.30
63	604.50
64	601.80

Columnna	T1 [°C]
65	599.10
66	596.40
67	593.70
68	591.00
69	588.30
70	585.70
71	583.00
72	580.40
73	577.80
74	575.10
75	572.50
76	569.90
77	567.30
78	564.80
79	562.20
80	559.60
81	557.10
82	554.60
83	552.00
84	549.50
85	547.00
86	544.50
87	542.00
88	539.60
89	537.10
90	534.60
91	532.20
92	529.80
93	527.30
94	524.90
95	522.50
96	520.10
97	517.70

Columna	T1 [°C]
98	515.40
99	513.00
100	510.70

7.3 Distribución de T2 a la salida en eje x

Columna	T2 [°C]
0	245.7
1	244.90
2	244.00
3	243.20
4	242.40
5	241.60
6	240.70
7	239.90
8	239.10
9	238.30
10	237.50
11	236.60
12	235.80
13	235.00
14	234.20
15	233.40
16	232.60
17	231.80
18	231.00
19	230.20
20	229.40
21	228.60
22	227.80
23	227.00
24	226.20
25	225.50
26	224.70
27	223.90
28	223.10
29	222.30
30	221.60
31	220.80

Columnna	T2 [°C]
32	220.00
33	219.20
34	218.50
35	217.70
36	216.90
37	216.20
38	215.40
39	214.70
40	213.90
41	213.20
42	212.40
43	211.70
44	210.90
45	210.20
46	209.40
47	208.70
48	207.90
49	207.20
50	206.50
51	205.70
52	205.00
53	204.30
54	203.50
55	202.80
56	202.10
57	201.40
58	200.70
59	199.90
60	199.20
61	198.50
62	197.80
63	197.10
64	196.40

Columnna	T2 [°C]
65	195.70
66	195.00
67	194.30
68	193.60
69	192.90
70	192.20
71	191.50
72	190.80
73	190.10
74	189.40
75	188.70
76	188.10
77	187.40
78	186.70
79	186.00
80	185.30
81	184.70
82	184.00
83	183.30
84	182.70
85	182.00
86	181.30
87	180.70
88	180.00
89	179.30
90	178.70
91	178.00
92	177.40
93	176.70
94	176.10
95	175.40
96	174.80
97	174.20

Columna	T2 [°C]
98	173.50
99	172.90
