



INSTITUTO TECNOLÓGICO NACIONAL DE  
MEXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO NACIONAL DE  
TUXTLA GUTIÉRREZ

**SIMULACION DE PROCESOS EN INGENIERIA QUIMICA  
APLICADA A INTERCAMBIADOR DE CALOR**

Reporte de residencia profesional que presenta:

Belén Berenice Popomeyá Platero

Como requisito para acreditar la residencia profesional de la licenciatura  
en:

Ingeniería Química

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas junio de 2023

## ***AGRADECIMIENTOS***

A lo largo de esta etapa de mi vida he conocido a mucha gente, tanto estudiante, maestros, etc. Cada uno de ellos me ha enseñado muchas cosas, como trabajar en equipo, a ser dedicado, perseverante, entre otras cosas, las cuales agradezco porque cada uno de ellos dieron un granito de arena para ayudarme en la persona que soy ahora.

Por otra parte, también agradezco a mi familia por estar moralmente y económicamente presentes en esta etapa profesional, sus consejos de vida, el apoyo inquebrantable que ellos brindan sin pedir nada a cambio.

Agradezco a mis asesores de residencia por tomarse el tiempo de irnos ayudando con nuestro proyecto, para poder presentar un excelente trabajo ante la academia y sobre todo tener este trabajo con el fin de poder ayudar en el futuro a algún alumno de nuestra carrera.

Esto ha sido una carrera larga llena de retos y mucho conocimiento; No fue fácil, pero al final valió la pena cada sacrificio, desvelo, etc. Por último, pero no menos importante, me agradezco a mí misma por ser capaz de esto y mucho más.

## ***RESUMEN***

El presente proyecto nos permite conocer el valor de la simulación de procesos en la carrera de ingeniería química, como una herramienta de trabajo el cual permite a los estudiantes representar y visualizar aplicaciones industriales. El presente trabajo de residencia se aplicó a intercambiadores de calor. Se hicieron simuladores en Excel y se verificaron los resultados obtenidos en el Software DWSIM.

Los programas implementados en este proyecto permiten predecir el proceso real, validarlo y obtener la configuración óptima con programas sencillos de utilizar resultando simulador con la mayor elegancia y versatilidad que permite entender cómo se analiza un proceso, cómo se llega a su modelo matemático correspondiente y cómo se obtienen múltiples soluciones a través de procedimientos digitales.

## ***ABSTRACT***

The present project allows us to know the value of process simulation in the chemical engineering career, as a work tool which allows students to represent and visualize industrial applications. This residency work was applied to heat exchangers. Simulators were made in Excel and the results obtained were verified in the DWSIM software.

The programs implemented in this project allow predicting the real process, validating it and obtaining the optimal configuration with simple to use programs, resulting in a simulator with the greatest elegance and versatility that allows understanding how to analyze a process, how to arrive at its corresponding mathematical model and how to obtain multiple solutions through digital procedures.

## *INDICE*

Capítulo 1. Generalidades.....	7
1.1 Descripción de la empresa .....	7
1.1.1 Historia de la empresa .....	7
1.1.2 Misión.....	8
1.1.3 Visión .....	8
1.1.4 Departamento de ingeniería química y bioquímica .....	8
1.1.5 Localización .....	8
1.1.6 Mapa .....	9
1.2 Problema a resolver .....	9
1.2.1 Alcances y localizaciones .....	9
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivo específico .....	10
1.4 Justificación.....	10
Capítulo 2. Marco teórico.....	11
2.1 Tipos de intercambiadores de calor.....	11
2.1.1 Equipo de transferencia de calor cuya función es cambiar la entalpia de una corriente.....	11
2.2 Flujo paralelo.....	11
2.3 Flujo en contracorriente .....	12
2.4 Flujo cruzado.....	13
2.5 Balances simultáneos de masa y calor.....	14
2.6 Ecuación de Bernoulli.....	16
Capítulo 3. Procedimiento y resultados.....	20
3.1 Simulador Horno en Excel.....	20

3.1.1 Diagrama de flujo .....	20
3.1.2 Modelo matemático.....	21
3.1.3 Algoritmo.....	21
3.1.4 Grafica de las propiedades del agua .....	23
3.1.5 Propiedades del vapor de agua dentro del horno .....	23
3.1.6 Tabla la viscosidad del agua vs temperatura.....	24
3.1.7 Grafica conductividad térmica vs temperatura del agua .....	24
3.1.8 gráfica del Número de prandtl vs la temperatura del agua.....	25
3.1.9 Propiedades del aire fuera del horno .....	25
3.2 Simulador de tubo contracorriente en Excel .....	26
3.2.1 Diagrama.....	26
3.2.2 Datos del simulador .....	26
3.2.3 Modelo matemático .....	27
3.2.4 Base de datos del metanol.....	27
3.2.5 Base de datos del agua.....	28
3.2.6 Cálculos.....	28
3.2.7 Algoritmo.....	29
3.2.8 Resultados.....	29
3.3 Simulación en DWSIM.....	30
4. Conclusión.....	30
5. Fuentes de información .....	31

## *INTRODUCCION*

El ingeniero químico es multifuncional, dentro de su profesión puede realizar muchas cosas entre las cuales está la realización de diagramas de flujo de proceso y la generación de balances de masa y energía; Estos modelos se vuelven más complejos ya que incluyen realización de cálculos como dimensionamiento de equipos, estimación de costos capitales y de operación. La simulación es un requisito importante para el diseño de procesos.

Para poder entender de manera más clara este trabajo vamos a explicar cada concepto, primero que nada ¿Que es una simulación de procesos y para qué sirve?

Mediante la simulación los ingenieros podemos identificar problemas potenciales en el tiempo y tomar las debidas acciones correctivas, Los simuladores de proceso ofrecen la oportunidad de reducir el tiempo requerido para el desarrollo de proceso. Permiten realizar comparaciones de las alternativas de proceso en una base consistente de tal forma que un gran número de ideas puedan ser sintetizadas y analizadas interactivamente en un corto período de tiempo (Tochampa et al., 2005). La simulación integrada de procesos también permite el estudio de las interacciones que ocurren entre las etapas iniciales y finales del mismo (Rouf et al., 2001).

Una vez explicado que es una simulación de procesos en ingeniería química queda la incógnita de los intercambiadores de calor. Son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperatura diferente y evitan al mismo tiempo mezclarse entre sí.

En los intercambiadores, la transferencia de calor generalmente involucra la convección.

en cada fluido y se conduce a través de las paredes que los separan. El análisis de transferencia de calor es simple, considerando que la contribución de transferencia de calor total  $U$ . La cantidad de calor entre dos fluidos en un lugar dado en un intercambiador de calor depende del tamaño de la diferencia de temperatura local que hay dentro a lo largo de la intersección.

## **CAPITULO 1: GENERALIDADES**

### **1.1 Descripción de la empresa**

Este proyecto se desarrolló en el Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez; En el área de desarrollo del proyecto.

#### 1.1.1 Historia del ITTG:

En la década de los 70's, se incorpora el estado de Chiapas al movimiento educativo nacional extensión educativa, por intervención del Gobierno del Estado de Chiapas ante la federación.

Esta gestión dio origen a la creación del Instituto Tecnológico Regional de Tuxtla Gutiérrez (ITRTG) hoy Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).

El día 23 de agosto de 1971 el Gobernador del Estado, Dr. Manuel Velasco Suárez, colocó la primera piedra de lo que muy pronto sería el Centro Educativo de nivel medio superior más importante de la entidad.

El día 22 de octubre de 1972, con una infraestructura de 2 edificios con 8 aulas, 2 laboratorios y un edificio para talleres abre sus puertas el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez con las carreras de Técnico en Máquinas de Combustión Interna, Electricidad, Laboratorista Químico y Máquinas y Herramientas.

En el año 1974 dio inicio la modalidad en el nivel superior, ofreciendo las carrera de Ingeniería Industrial en Producción y Bioquímica en Productos Naturales.

En 1980 se amplió la oferta educativa al incorporarse las carreras de Ingeniería Industrial Eléctrica e Ingeniería Industrial Química.

En 1987 se abre la carrera de Ingeniería en Electrónica y se liquidan en 1989 las carreras del sistema abierto del nivel medio superior y en el nivel superior se reorientó la oferta en la carrera de Ingeniería Industrial Eléctrica y se inicia también Ingeniería Mecánica.

En 1991 surge la licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales.

Desde 1997 el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ofrece la Especialización en Ingeniería Ambiental como primer programa de postgrado.

En 1998 se estableció el programa interinstitucional de postgrado con la Universidad Autónoma de Chiapas para impartir en el Instituto Tecnológico la Maestría en Biotecnología.

En el año 1999 se inició el programa de Maestría en Administración como respuesta a la demanda del sector industrial y de servicios de la región.

A partir de 2000 se abrió también la Especialización en Biotecnología Vegetal y un año después dio inicio el programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica y la Licenciatura en Informática.

#### 1.1.2 Misión del ITTG:

Formar de manera integral profesionistas de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos.

#### 1.1.3 Visión del ITTG:

Ser una Institución de Excelencia en la Educación Superior Tecnológica del Sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región.

#### 1.1.4 Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica:

El departamento de ingeniería química y bioquímica está localizado en el edificio “H”, ahí se realizan las actividades administrativas de ambas carreras, el Ingeniero Amín Rodríguez Meneses es el jefe del Departamento.

#### 1.1.5 Localización:

El Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez se encuentra ubicado en la carretera Panamericana kilómetro 1080, de la Delegación Terán, municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

### 1.1.6 Mapa del ITTG



### **1.2 PROBLEMA A RESOLVER**

Como estudiante de ingeniería química sabemos que en la carrera ocupamos de tecnología para poder resolver algunas ecuaciones de manera más eficaz y rápida. Es importante que durante el tiempo las tecnologías se vayan actualizando ya que no es igual usar un software de hace 20 años a uno más actual.

Las técnicas de simulación sirven para analizar los procesos actuales (mejora y optimización) y procesos futuros (anticipación de soluciones) con el fin de obtener el diseño más eficiente con diferentes objetivos.

#### **1.2.1 ALCANCES Y LIMITACIONES**

Al desarrollar los simuladores tanto en excel como en dwsim nos permite ver cómo trabaja cada programa, las herramientas que nos ofrece. Estos simuladores se construyen con la ayuda de una base de datos, lo que permitirá un mejor entendimiento y aplicación de los conceptos estudiados en la materia.

Sin embargo, al desarrollar otro prototipo, es importante tener en cuenta las siguientes limitaciones:

- Falta de destreza en el manejo de Excel por parte de los alumnos.
- Escasa habilidad lógica para construir modelos matemáticos.
- Falta de experiencia en el desarrollo de algoritmos de programación.

### ***1.3 OBJETIVOS***

#### **1.3.1 Objetivo general**

Construir un simulador en EXCEL para desarrollar análisis de sensibilidad y verificar su validez en DWSIM.

#### **1.3.2 Objetivo específico**

- Construir los modelos matemáticos usando las ecuaciones de balance, seleccionando funciones y variables que permitan manejar diferentes condiciones de operación.
- Crear una base de datos de equilibrio que incluya la información recopilada y validada, y que sea fácilmente accesible y utilizable por los profesionales y estudiantes de la industria química.

### ***1.4 JUSTIFICACION:***

Los programas implementados en este proyecto permiten predecir el proceso real, validarlo y obtener la configuración óptima con programas sencillos de utilizar resultando simulador con la mayor elegancia y versatilidad que permite entender cómo se analiza un proceso, cómo se llega a su modelo matemático correspondiente y cómo se obtienen múltiples soluciones a través de procedimientos digitales.

Es importante cumplir con los objetivos de este proyecto ya que un ingeniero químico debe utilizar las herramientas tecnológicas actuales con el fin de hacer el trabajo más sencillo.

## CAPITULO 2

### MARCO TEORICO

#### 2.1 Tipos de intercambiadores de calor

Existen diferentes aplicaciones a la transferencia de calor y cada una tiene accesorios y configuraciones de equipo especiales para el tiempo de transferencia.

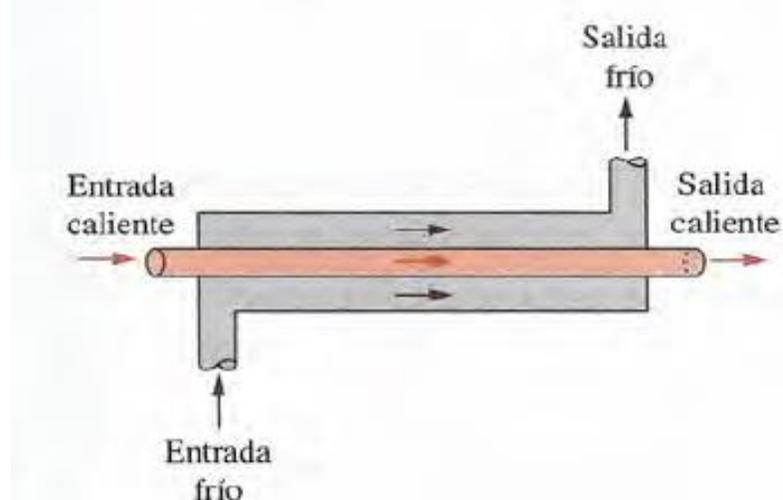
##### 2.1.1 Equipo de transferencia de calor cuya función es cambiar la entalpia de una corriente:

**Recuperadores:** Los fluidos frío y caliente están separados mediante una pared.

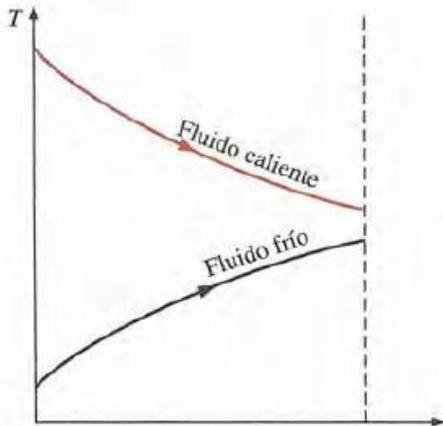
**Mecanismos:** Convección hacia y desde la pared y conducción a través de ésta.

**Regeneradores:** Los fluidos caliente y frío ocupan el mismo espacio en el núcleo del intercambiador o matriz. Esta funciona como un almacén de calor que es calentado periódicamente por el fluido de mayor temperatura y luego transfiere ese calor a un fluido de menor temperatura.

**2.2 Flujo en paralelo o corriente:** en el flujo paralelo los dos fluidos, el frío y el caliente, entran en el intercambiador por el mismo extremo y se mueven en la misma dirección.



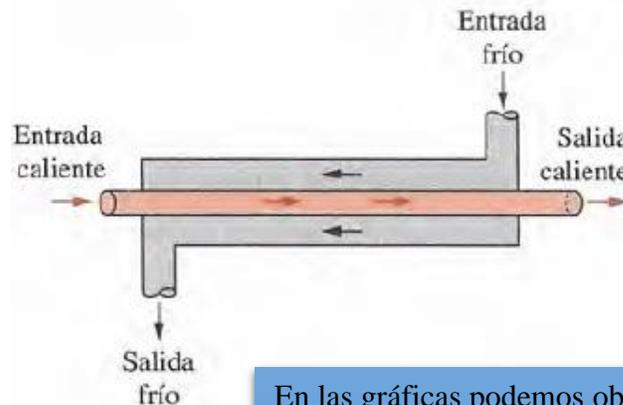
Yunus A. Cengel (2007). Transferencia de calor y masa;  
Monterrey Mexico. Mc Gran gill.



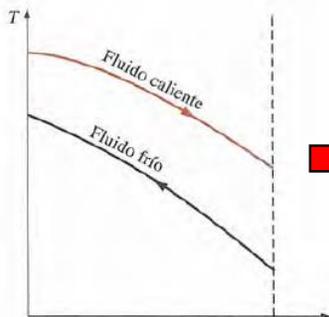
Yunus A. Cengel (2007). Transferencia de calor y masa; Monterrey Mexico.Mc Gran gill.

En las gráficas podemos observar Como el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, la temperatura de los fluidos se aproximan la una a la otra, es decir que uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente.

**2.3 Flujo en contracorriente o contraflujo:** en el contraflujo los fluidos entran en el intercambiador por los extremos opuestos y fluyen en direcciones opuestas. En contraste con el intercambiador de calor de flujo paralelo, el intercambiador de contraflujo puede presentar la temperatura más alta en el fluido frío y la más baja temperatura en el fluido caliente una vez realizada la transferencia de calor en el intercambiador



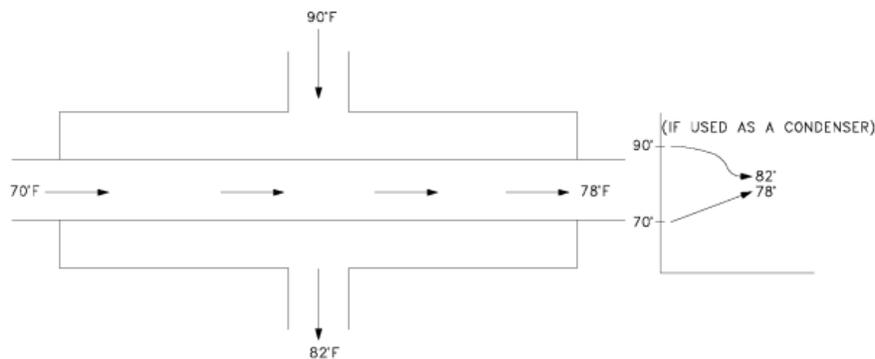
Yunus A. Cengel (2007). Transferencia de calor y masa; Monterrey Mexico.Mc Gran gill.



Yunus A. Cengel (2007). Transferencia de calor y masa; Monterrey Mexico.Mc Gran gill.

En las gráficas podemos observar como el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a al temperatura del fluido de entrada

**2.4 Flujo cruzado:** Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usados donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásico. Un ejemplo típico de este tipo de intercambiador es en los sistemas de condensación de vapor, donde el vapor exhausto que sale de una turbina entra como flujo externo a la carcasa del condensador y el agua fría que fluye por los tubos absorbe el calor del vapor y éste se condensa y forma agua líquida. Se pueden condensar grandes volúmenes de vapor de agua al utiliza este tipo de intercambiador de calor. En la actualidad, la mayoría de los intercambiadores de calor no son puramente de flujo paralelo, contraflujo, o flujo cruzado; estos son comúnmente una combinación de los dos o tres tipos de intercambiador.



Un intercambiador de calor real que incluye dos, o los tres tipos de intercambio descritos anteriormente, resulta muy complicado de analizar. La razón de incluir la combinación de varios tipos en uno solo, es maximizar la eficacia del intercambiador dentro de las restricciones propias del diseño, que son: tamaño, costo, peso, eficacia requerida, tipo de fluidos, temperaturas y presiones de operación, que permiten establecer la complejidad del intercambiador.

Por otra parte, dentro de los intercambiadores de calor de pasos múltiples:

Un método que combina las características de dos o más intercambiadores y permite mejorar el desempeño de un intercambiador de calor es tener que pasar los dos fluidos varias veces dentro de un intercambiador de paso simple. Cuando los fluidos del intercambiador intercambian calor más de una vez, se denomina intercambiador de múltiples pasos. Sí el fluido sólo intercambia calor en una sola vez, se denomina intercambiador de calor de paso simple o de un solo paso.

Comúnmente el intercambiador de múltiples pasos invierte el sentido del flujo en los tubos al utilizar dobleces en forma de "U" en los extremos, es decir, el doblez en forma de "U" permite al fluido fluir de regreso e incrementar el área de transferencia del intercambiador. Un segundo método para llevar a cabo múltiples pasos es insertar baffles o platos dentro del intercambiador.

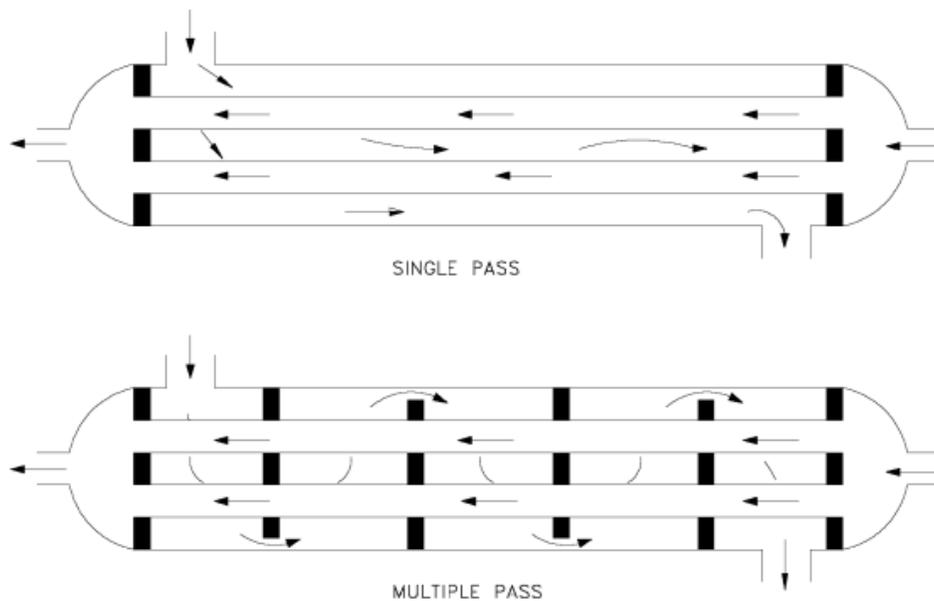


Figure 6: Intercambiador de un solo paso e intercambiador de multiple paso.

## 2.5

### Balances simultáneos de masa y calor

Los balances de materia y energía (BMyE) son una de las herramientas más importantes con las que cuenta la ingeniería de procesos y se utilizan para contabilizar los flujos de materia y energía entre un determinado proceso industrial y los alrededores o entre las distintas operaciones que lo integran. Por tanto, en la realización del PFC, los BMyE nos permitirán conocer los **caudales másicos** de todas las corrientes materiales que intervienen en el proceso, así como las **necesidades energéticas** del mismo, que en último término se traducirán en los requerimientos de servicios auxiliares, tales como vapor o refrigeración.

Dentro del PFC los BMyE tienen su lugar lógico en el Estudio de Viabilidad, ya que es por medio de ellos que se obtiene la información necesaria para proceder al dimensionamiento de los equipos y la estimación de las necesidades de servicios auxiliares (vapor, aire, refrigeración). En la Memoria de Cálculo

deberán incluirse los BMyE de la alternativa elegida, como un anexo de la misma.

La aplicación de los BM no es conceptualmente complicada, y sus fundamentos teóricos pueden consultarse con detalle en textos como los que se incluyen en la sección de búsqueda de información [Balances de Materia y Energía], junto con numerosos ejemplos de aplicación a diferentes operaciones y procesos. A continuación se repasan las ideas básicas para el planteamiento de los BM, y se indican posibles estrategias para su utilización en el PFC. Los BM se basan en la ley de conservación de la materia, la cual, rigurosamente hablando, hay que aplicarla al conjunto materia-energía, y no a la materia o energía por separado. Sin embargo, en las condiciones que se dan en los procesos industriales objeto de los PFC en la UGR, al no abordarse el caso de los reactores nucleares, no existe transformación de materia en energía o viceversa, con lo que la forma general del balance de materia TOTAL a un sistema, será:

$$\begin{bmatrix} \text{ENTRADA} \\ \text{DE} \\ \text{MATERIA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{SALIDA} \\ \text{DE} \\ \text{MATERIA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{ACUMULACIÓN} \\ \text{DE} \\ \text{MATERIA} \end{bmatrix}$$

La forma del balance a cada uno de los componentes será la misma, excepto cuando existe reacción química, ya que en ese caso habrá que considerar la aparición o desaparición de los componentes individuales por efecto de la reacción (sin embargo la masa total del sistema nunca variará). Por ello el BM al componente 'i' tendrá la forma:

$$\begin{bmatrix} \text{ENTRADA} \\ \text{DEL} \\ \text{COMPONENTE 'i'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{GENERACIÓN} \\ \text{NETA DEL} \\ \text{COMPONENTE 'i'} \\ \text{(sólo con reacción} \\ \text{química)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{SALIDA} \\ \text{DEL} \\ \text{COMPONENTE 'i'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{ACUMULACIÓN} \\ \text{DEL} \\ \text{COMPONENTE 'i'} \end{bmatrix}$$

Una situación muy frecuente es que el proceso sea continuo, con lo cual el término de acumulación será 0. Tal y como se ha indicado los BM se pueden

aplicar a una unidad de proceso (un equipo), como a todo el proceso completo. Para una unidad o equipo, podrán plantearse tantos BM independientes como componentes intervienen en el mismo, y a un proceso completo se le podrán plantear un número de BM independientes igual a la suma de los de todas las unidades del mismo, entendiendo como unidades de un proceso los equipos u operaciones que lo integran. Además, en algunos casos existen relaciones impuestas entre las distintas corrientes que nos pueden servir como ecuaciones adicionales a los BM.

## 2.6 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli también denominada principio de Bernoulli o trinomio de Bernoulli, fue estudiada por el matemático, estadístico, físico y médico neerlandés-suizo Daniel Bernoulli en la década de 1700. Bernoulli estudio el comportamiento y las fuerzas presentes en un fluido en movimiento, y estableció que en un flujo la presión estática más la presión dinámica es constante.

$$q + p = p_0$$

*energía cinética + energía de flujo + energía potencial gravitatoria = constante [1]*

La ecuación de Bernoulli tiene gran importancia en la mecánica de fluidos; relaciona la presión, la velocidad y la altura en flujos constantes, incompresibles y con fuerza de fricción despreciable. La ecuación de Bernoulli no es aplicada a todo flujo, solo en aquellos donde la viscosidad del fluido sea despreciable en comparación con los efectos de inercia y gravitación. Es decir, solo se aplica a regiones en las que la viscosidad o fuerza de fricción interna es neta, el caudal es constante y el fluido es incompresible (densidad constante).

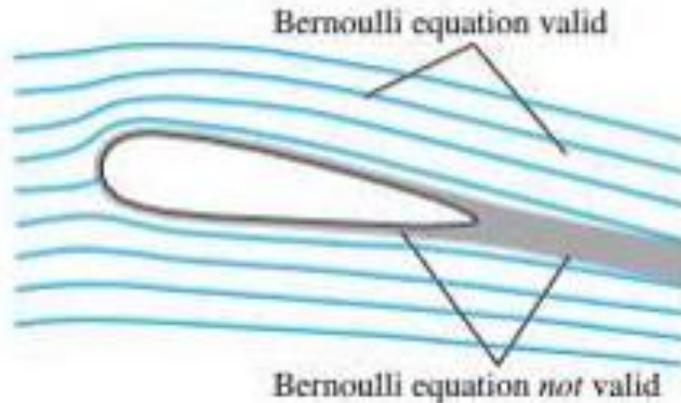


Figura 1. Validez de la Ecuación de Bernoulli

En un flujo constante la aceleración no es cero, a pesar de que la aceleración es la tasa de cambio de la velocidad con el tiempo, y en un flujo constante no hay cambio a través del tiempo, un fluido como el agua se acelera a través de una embocadura, es decir que no cambia a través del tiempo en una ubicación específica, pero puede cambiar en magnitud de un punto a otro, como sucede en una manguera común, en la cual la velocidad se mantiene constante en un punto específico, pero varía desde la entrada hasta la salida de la misma.

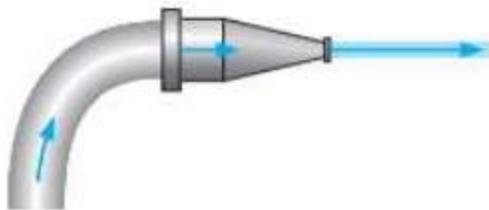


Figura 2. En un flujo constante, un fluido no puede tener aceleración en un punto, pero sí en el espacio.

Expresado matemáticamente como:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial s} ds + \frac{\partial V}{\partial t} dt \quad \text{and} \quad \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial s} \frac{ds}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

La aceleración de un flujo constante es debida al cambio de velocidad respecto a la posición

$$a_s = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial s} \frac{ds}{dt} = \frac{\partial V}{\partial s} V = V \frac{dV}{ds} \quad [3]$$

La ecuación de Bernoulli fue derivada en forma de ecuación por Leonhard Euler en 1755, el cual estableció que el valor de la constante podía ser evaluado en un punto cualesquiera de la corriente, donde sean conocidas las variables de presión, densidad, velocidad y altura respecto al marco de referencia.

$$\text{flujo constante} = \int \frac{aP}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{Constante (a lo largo de una línea de corriente)}$$

$$\text{flujo constante incomprensible} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{Constante (a lo largo de una línea de corriente)}$$

Dada entre dos puntos de la corriente se establece como

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

El flujo de energía, la energía cinética y la energía potencial gravitatoria son las formas mecánicas de la energía, de este modo la ecuación de Bernoulli se puede entender como el principio de conservación de la energía mecánica, es decir, en un flujo constante incomprensible y con fricción despreciable, las diversas formas de energía mecánica se transforman de una forma a otra conservándose la energía total.

Como no hay fricción, no habrá energía mecánica disponible en los flujos y no habrá conversión a energía térmica. El principio de Bernoulli en términos de la segunda ley de Newton (del movimiento), la cual es un balance de energía mecánica, se define como el trabajo realizado por las fuerzas de presión y gravitación sobre una partícula cualesquiera del fluido, el cual es equivalente al incremento de la energía cinética de la partícula

El teorema de Bernoulli se considera una aplicación directa de la ecuación de energía o ley de conservación de la energía, y se basa en el supuesto de que el fluido no presenta fricción y es permanente, y se produce en una línea de corriente, la cual es una línea de un flujo en movimiento en la cual todas las partículas que se encuentren sobre ella en un instante dado, tendrán vectores de velocidad tangentes a ella. Así, se determina la dirección que lleva el flujo en un punto dado. En un equilibrio de fuerzas en dirección n normal a la línea de corriente, se obtiene la siguiente relación

$$\frac{P}{\rho} + \int \frac{V^2}{R} dn + gz = \text{constante}$$

Donde R es el radio local de la curva de la línea de corriente, en la cual la presión disminuye hacia el centro de la curvatura haciendo que las partículas experimenten una fuerza de aceleración centrípeta. Por otra parte para un flujo inestable la ecuación de Bernoulli establece que las energías cinéticas y potencial del fluido se pueden convertir en el flujo de energía, por lo cual la presión cambia.

$$\int \frac{dP}{\rho} + \int \frac{\partial V}{\partial t} ds + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante}$$

Si se multiplica la ecuación por la densidad.

$$P + \rho \frac{V^2}{2} + \rho gz.$$

Donde P es la presión estática o presión termodinámica real del fluido.

$\frac{V^2}{2}$  es la presión dinámica y representa el aumento de presión cuando el fluido en movimiento es llevado a una parada isoentrópicamente.

$gz$  es la presión hidrostática la cual depende del nivel de referencia seleccionado

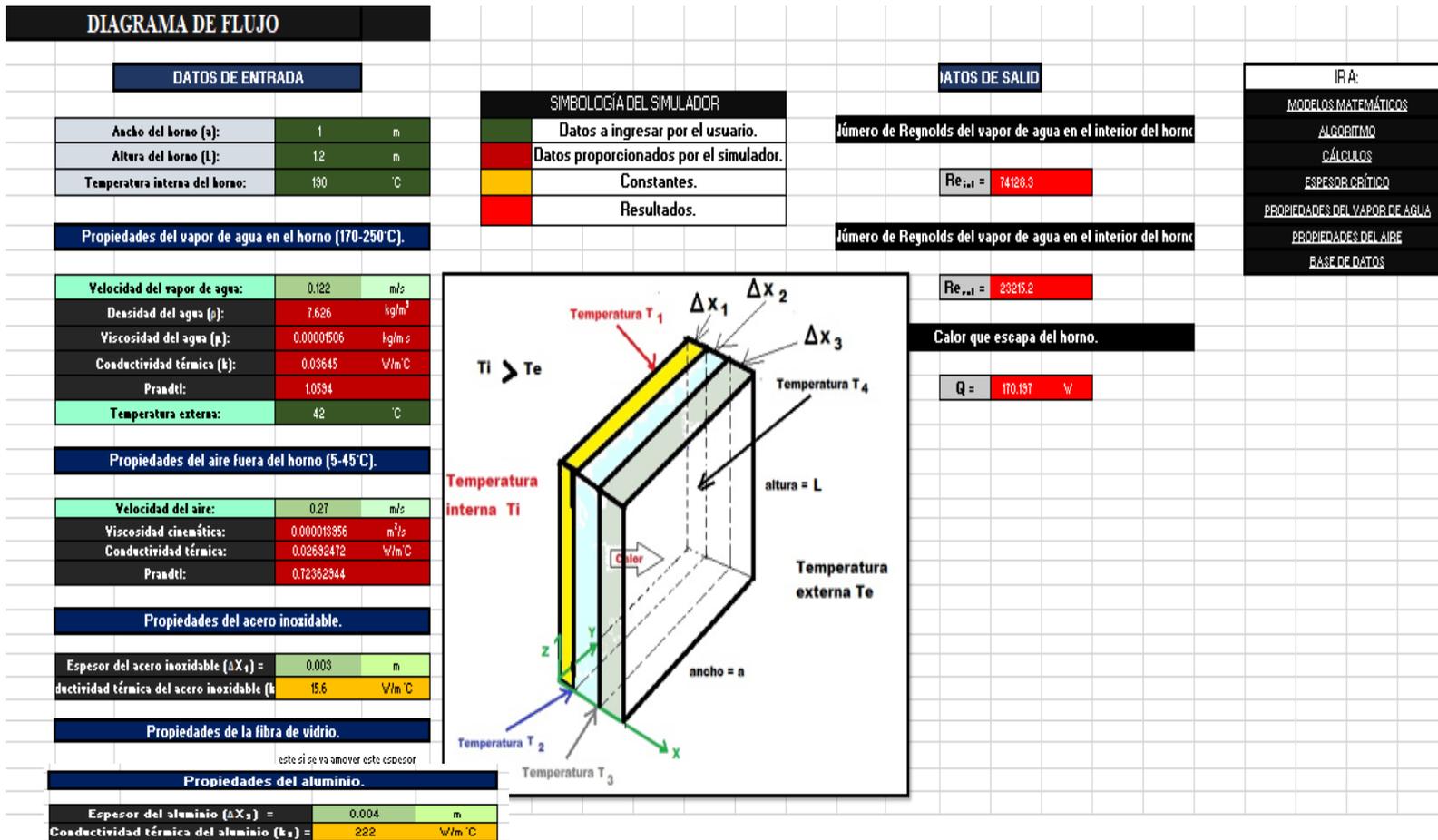
## CAPITULO 3

### PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

#### 3.1 SIMULADOR HORNO EN EXCEL

El primer simulador permite el diseño de un horno rectangular, a partir de optimizar el aislamiento de una de sus paredes, Se debe proporcionar las dimensiones requeridas. Los espesores de dos placas que soportan el aislante que se optimiza.

##### 3.1.1 DIAGRAMA DE FLUJO



### 3.1.2 MODELO MATEMATICO .

MODELOS MATEMÁTICOS	
<b>1. ECUACIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS INTERNO.</b> $Re_{int} = \frac{Lv\rho}{\mu}$	<b>2. ECUACIÓN DEL COEFICIENTE LOCAL DE TRANSFERENCIA EN EL INTERIOR DEL HORNO.</b> $h_i = \frac{0.332k}{L} Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$
<b>3. ECUACIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS EXTERNO</b> $Re_{ext} = \frac{Lv}{\gamma}$	<b>4. ECUACIÓN DEL COEFICIENTE LOCAL DE TRANSFERENCIA EN EL EXTERIOR DEL HORNO.</b> $h_e = \frac{0.0288k}{L} Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}}$
<b>5. ECUACIÓN PARA CALCULAR EL CALOR QUE ESCAPA DEL HORNO.</b> $Q = \frac{a L (T_i - T_e)}{\left[ \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta X_1}{k_1} + \frac{\Delta X_2}{k_2} + \frac{\Delta X_3}{k_3} + \frac{1}{h_e} \right]}$	

### 3.1.3 ALGORITMO

**Para diseñar un horno rectangular deberás realizar los siguientes pasos:**

- 1.- Ingresar la temperatura interna deseada a la cual trabajará el horno.
- 2.- Calcular el número de Reynolds del vapor de agua en el interior del horno:
  - 2.1.- Añadir la velocidad del vapor de agua.
  - 2.2.- De la base de datos realizada, el simulador te proporcionará la densidad y la viscosidad del agua con respecto a la temperatura añadida.
  - 2.3.- Agregar la altura (L) que deberá tener el horno.
  - 2.4.- Con los datos obtenidos, calculamos el número de Reynolds interno con la ecuación:
 
$$Re_{int} = \frac{Lv\rho}{\mu}$$
- 3.- Calcular el coeficiente local de transferencia en el interior del horno:
  - 3.1.- El simulador te proporcionará la conductividad térmica del vapor con respecto a la temperatura interna.
  - 3.2.- Asimismo, el simulador te brindará el número de Prandtl.
  - 3.3.- Finalmente, con los datos obtenidos podrás calcular el coeficiente local de transferencia en el interior del horno aplicando la siguiente ecuación:
 
$$h_i = \frac{0.332k}{L} Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$$
- 4.- Calcular el número de Reynolds del aire en el exterior del horno:
  - 4.1.- Ingresar la temperatura externa del horno.

4.2.- Añadir la velocidad del exterior del aire.

4.3.- En base a la temperatura externa propuesta, el simulador te proporcionará la conductividad cinemática del aire.

2.4.- Con los datos obtenidos, calculamos el número de Reynolds externo con la ecuación:

$$Re_{ext} = \frac{Lv}{\gamma}$$

5.- Calcular el coeficiente local de transferencia en el exterior del horno:

5.1.- De acuerdo al valor de la temperatura externa, el simulador te mostrará la conductividad térmica del aire.

5.2.- Asimismo, el simulador te proporcionará el número de Prandtl.

5.3.- Finalmente, con los datos obtenidos podrás calcular el coeficiente local de transferencia en el exterior del horno aplicando la siguiente ecuación:

$$h_e = \frac{0.0288k}{L} Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}}$$

6.- Calcular el calor que escapa del horno:

6.1.- Ingresar el ancho del horno (a).

6.2.- Añadir las propiedades de los materiales del horno.

6.2.1.- Propiedades del acero inoxidable:

6.2.1.1.- Espesor del acero inoxidable ( $\Delta X_1$ ).

6.2.1.2.- Conductividad térmica del acero inoxidable ( $k_1$ ).

6.2.2.1.- Espesor de la fibra de vidrio ( $\Delta X_2$ ).

6.2.2.2.- Conductividad térmica de la fibra de vidrio ( $k_2$ ).

6.2.3.- Propiedades del aluminio:

6.2.3.1.- Espesor del aluminio ( $\Delta X_3$ ).

6.2.3.2.- Conductividad térmica del aluminio ( $k_3$ ).

6.3.- Finalmente, con los datos obtenidos podrás calcular el calor que se escapa del horno aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\alpha L (T_i - T_e)}{\left[ \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta X_1}{k_1} + \frac{\Delta X_2}{k_2} + \frac{\Delta X_3}{k_3} + \frac{1}{h_e} \right]}$$

7.- Para conocer la variación del calor (Q) con respecto al espesor ( $\Delta X_2$ ) deberás de realizar una gráfica:

7.1.- Deberás proponer valores al espesor ( $\Delta X_2$ ) y calcular el calor (Q) que se escapa del horno para cada valor propuesto

7.2.- Una vez construida una tabla con los valores propuestos y calculados, podrás obtener la gráfica que mostrará la variación del calor con respecto al espesor ( $\Delta X_2$ ).

8.- Si necesitas conocer el espesor crítico deberás realizar una condición:

8.1.- Proponer un valor límite del calor (Q) que se escapa del horno.

8.2.- Agregar a la tabla obtenida en el paso 7 otra columna en la que agregues la condición.

8.3.- La condición deberá ser la siguiente:

8.3.1.- Si (VALOR DEL CALOR CALCULADO <= AL VALOR DEL CALOR LÍMITE PROPUESTO, "EL ESPESOR ES CRÍTICO", "EL ESPESOR NO ES CRÍTICO").

### 3.1.4 GRAFICA DE LAS PROPIEDADES DEL AGUA

Para el espesor crítico, donde en el eje de las x tenemos el espesor de la fibra de vidrio, mientras que en el eje de las y tenemos el calor que escapa del horno. Sabemos que esta en  $Q = 84.7277 \text{ W}$  ya que es a partir de ahí no hay tanta variación entre los valores de  $Q$

$\Delta X_2$ (m)	Q (W)	PENDIENTE	ESPESOR
0.005	170.1974		EL ESPESOR NO ES CRÍTICO
0.01	151.1395	-3811.5744	EL ESPESOR NO ES CRÍTICO
0.015	135.9199	-3043.9287	EL ESPESOR NO ES CRÍTICO
0.02	123.485	-2486.971	EL ESPESOR NO ES CRÍTICO
0.025	113.1347	-2070.0632	EL ESPESOR NO ES CRÍTICO
0.03	104.3853	-1749.8816	EL ESPESOR NO ES CRÍTICO
0.035	96.8920	-1498.6523	EL ESPESOR NO ES CRÍTICO
0.04	90.4025	-1297.9026	EL ESPESOR NO ES CRÍTICO
<b>0.045</b>	<b>84.7277</b>	<b>-1134.958</b>	<b>EL ESPESOR ES CRÍTICO</b>
0.05	79.7233	-1000.8855	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.055	75.2771	-889.24527	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.06	71.3006	-795.29713	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.065	67.7231	-715.49031	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.07	64.4875	-647.1223	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.075	61.5470	-588.10671	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.08	58.8629	-536.81212	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.085	56.4032	-491.94797	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.09	54.1408	-452.4825	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.095	52.0529	-417.58294	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.1	50.1200	-386.57111	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.105	48.3256	-358.89024	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.11	46.6552	-334.07977	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.115	45.0964	-311.75611	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.12	43.6384	-291.59766	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.125	42.2717	-273.33317	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.13	40.9881	-256.73259	EL ESPESOR ES CRÍTICO
0.135	39.7801	-241.59976	EL ESPESOR ES CRÍTICO

**VALOR LÍMITE DEL CALOR QUE SE ESCAPA DEL HORNO.**

**Q = 90 W**



Se realizó diversas graficas de las propiedades del agua dentro de un horno. Primero sobre la densidad del agua vs la temperatura del agua

### 3.1.5 PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA DENTRO DEL HORNO

**PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA DENTRO DEL HORNO**

Tabla 1. Densidad del agua.

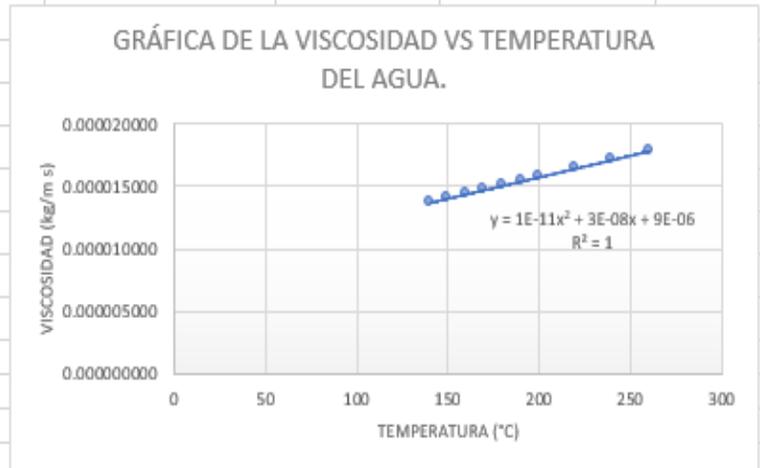
T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
140	1.965
150	2.546
160	3.256
170	4.119
180	5.153
190	6.388
200	7.852
220	11.6
240	16.73
260	23.69



### 3.1.6 TABLA VISCOSIDAD VS TEMPERATURA DEL AGUA

Tabla 2. Viscosidad del agua.

T (°C)	$\mu$ (kg/m s)
140	0.000013650
150	0.000013990
160	0.000014340
170	0.000014680
180	0.000015020
190	0.000015370
200	0.000015710
220	0.000016410
240	0.000017120
260	0.000017880



### 3.1.7 GRAGICA CONDUCTIVIDAD TERMICA VS TEMPERATURA DEL AGUA

Tabla 3. Conductividad térmica del agua.

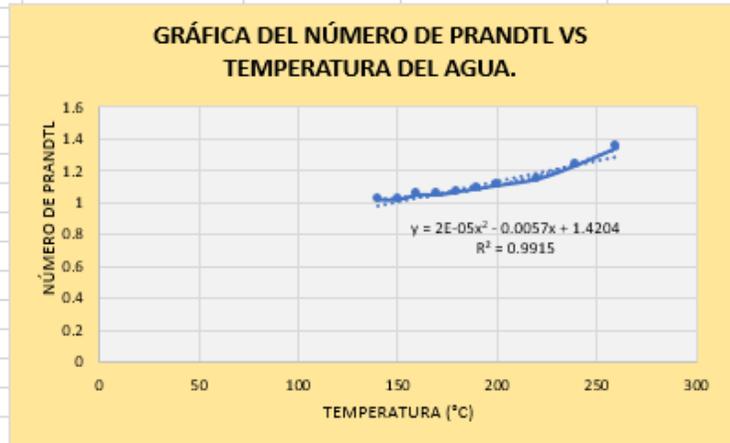
T (°C)	k (W/m °C)
140	0.0301
150	0.0316
160	0.0331
170	0.0347
180	0.0364
190	0.0382
200	0.0401
220	0.0442
240	0.0487
260	0.054



### 3.1.8 GRAFICA NUMERO DE PRANDTL VS TEMPERATURA DEL AGUA

Tabla 4. Número de Prandtl del agua.

T (°C)	Prandtl
140	1.02
150	1.02
160	1.05
170	1.05
180	1.07
190	1.09
200	1.11
220	1.15
240	1.24
260	1.35

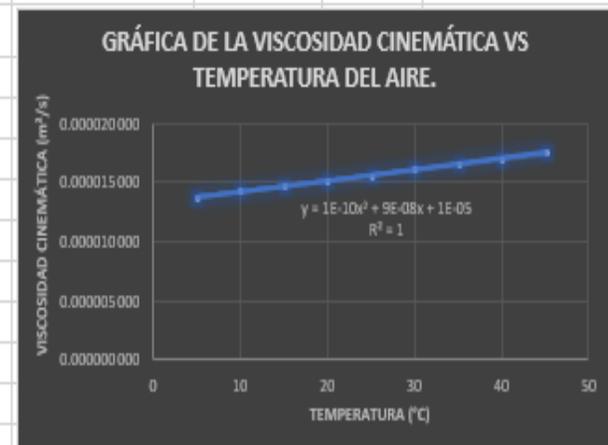


### 3.1.9 PROPIEDADES DEL AIRE FUERA DEL HORNO

#### PROPIEDADES DEL AIRE FUERA DEL HORNO

Tabla 1. Viscosidad del aire.

T (°C)	Visc. cinemática (m²/s)
5	0.000013820
10	0.000014260
15	0.000014700
20	0.000015160
25	0.000015620
30	0.000016080
35	0.000016550
40	0.000017020
45	0.000017500

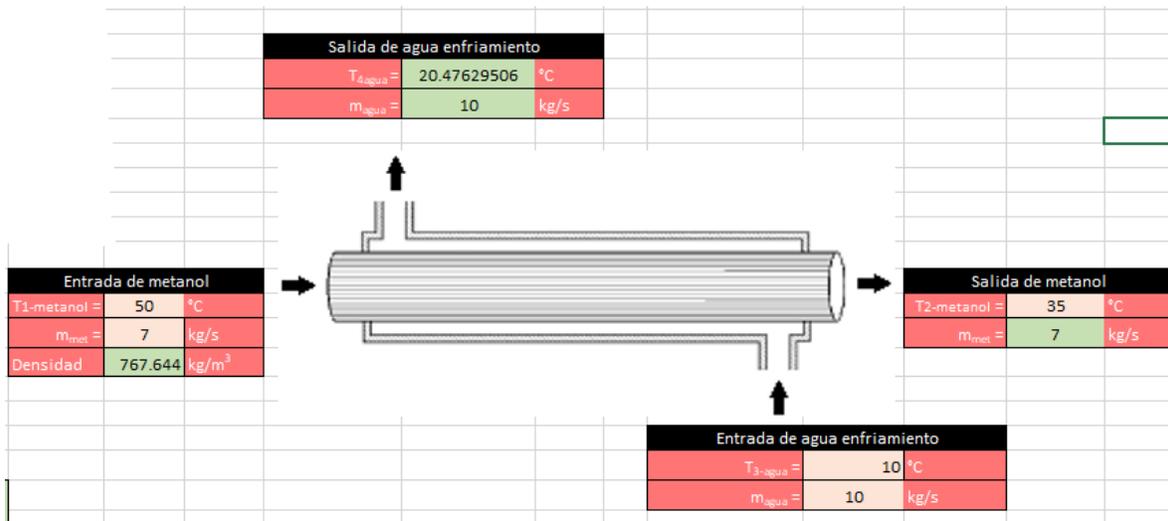


La tabla 2 es sobre la conductividad térmica del aire y la 3 del número de Prandtl del aire.

Con esto llegamos al fin del primer simulador para un horno, cabe aclarar que solo fue realizado en Excel ya que DWSIM no cuenta con la función de horno.

### 3.2 SIMULADOR DOBLE TUBO CON CONTRACORRIENTE EN EXCEL

#### 3.2.1 DIAGRAMA



Nota 1: el color rosa claro yo puedo modificar esos datos. El color verde No puedo modificar esos datos

Nota2 : Los valores para T1-metanol Deben ser menores a 64.7 °C.

#### 3.2.2 DATOS DEL SIMULADOR

Intercambiador de calor de doble tubo de acero inoxidable		
Diámetro nominal tubo interno =	2	pulg
Diámetro nominal tubo externo =	3	pulg
Diámetro interno tubo interior cédula 40 =	0.0525	m
Diámetro externo tubo interior cédula 40 =	0.0630	m
Diámetro interno tubo exterior cédula 40 =	0.0779	m
Diámetro externo tubo exterior cédula 40 =	0.0889	m
Longitud de los tubos	1.50	m

Los datos en color azul, son datos que el simulador da, el alumno podrá modificar solamente la longitud De los tubos (ambos tubos son de la misma longitud).

### 3.2.3 MODELO MATEMATICO

**Calor cedido por el fluido caliente**

$$Q_1 = m_{met} * Cp_{met}(T_{1-metanol} - T_{2-metanol})$$

**Calor absorbido por el agua**

$$Q_2 = m_{agua} * Cp_{agua}(T_{4-agua} - T_{3-agua})$$

**Calor media logaritmica en**

$$\Delta T_{ml-cc} = \frac{(T_{1-metanol} - T_{4-agua}) - (T_{2-metanol} - T_{3-agua})}{\ln\left(\frac{T_{1-metanol} - T_{4-agua}}{T_{2-metanol} - T_{3-agua}}\right)}$$

**Calculo del area de transferencia de calor en la superficie externa del tubo interior**

$$A = \pi D^2 L$$

**Coefficiente global de transferencia de calor**

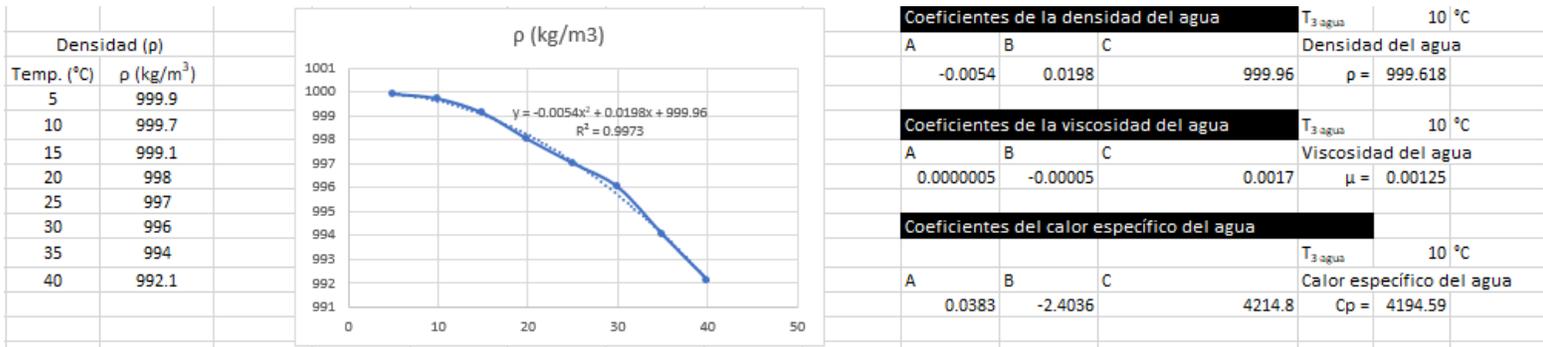
$$U = \frac{Q_1}{A * \Delta T_{ml-cc}}$$

### 3.2.4 BASE DE DATOS DEL METANOL

Densidad ( $\rho$ )			Coeficientes del metanol				
Temp. (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )			T <sub>1-metanol</sub> =	50 °C	T <sub>2-metanol</sub> =	35 °C
20	788.4		$\Delta T_{ml-metanol}$ =	42.055099			
30	779.1		Coeficientes de la densidad				
40	769.6		A	B	C	Densidad del metanol	
50	760.1		-0.0008	-0.8898	806.48	$\rho = 767.64$ kg/m <sup>3</sup>	
60	750.4		Coeficientes de la viscosidad				
70	740.4		A	B	C	Viscosidad del agua	
			0.00000005	-0.00001	0.0008	$\mu = 0.0005$ kg/m.s	
Viscosidad ( $\mu$ )			Coeficientes del calor especifico del metanol				
Temp. (°C)	$\mu$ (kg/m.s)			A	B	C	Calor especifico del metanol
20	0.0005857			0.013	-1.6875	4233.1	$Cp = 4185.1$ J/(kg**K)
30	0.0005088		Coeficientes de la conductividad térmica del metanol				
40	0.000446		A	B	C	Conductividad del metanol	
50	0.0003942		0.00000000000000000001	-0.00007	0.2002	$K = 0.1973$	
60	0.000351						
70	0.0003146						

Estos datos fueron recopilados de Yunus A. Cengel (2020); Transferencia de calor y masa. Mc Graw Hill.

### 3.2.5 BASE DE DATOS DEL AGUA



Estos datos fueron recopilados de Yunus A. Cengel (2020); Transferencia de calor y masa. Mc Graw Hill.

### 3.2.6 CALCULOS

SOLUCION					
<b>DATOS:</b>					
Flujo del metanol	m <sub>met</sub> =	7 kg/s	Flujo del agua de enfriamiento	m <sub>agua</sub> =	10 kg/s
Calor específico del metanol	C <sub>pmet</sub> =	4.185124 kJ/(kg*°K)	Calor específico del agua	C <sub>pagua</sub> =	4.194594 kJ/(kg*°K)
Temperatura entrada metanol	T <sub>1-metanol</sub> =	50 °C	Temperatura entrada del agua	T <sub>3-agua</sub> =	10 °C
Temperatura salida metanol	T <sub>2-metanol</sub> =	35 °C	Temperatura salida agua	T <sub>4-agua</sub> =	20.4763 °C
<b>CALCULO DE CALOR QUE CEDE EL METANOL</b>					
Fórmula:	$Q_1 = m_{met} * C_{pmet} (T_{1-metanol} - T_{2-metanol})$		$Q_1 = 439.438 \text{ kW}$		
<b>CALOR QUE ABSORBE EL AGUA</b>					
Fórmula:	$Q_2 = m_{agua} * C_{pagua} (T_{4-agua} - T_{3-agua})$		Pero $Q_1 = Q_2$		
Despejando T <sub>4-agua</sub> :					
$T_{4-agua} = T_{3-agua} + \frac{Q_2}{m_{agua-enft} * C_{pagua-enf}}$		$T_{4-agua} = 20.4763$			

#### CALCULO DE MEDIA LOGARITMICA PARA CONTRACORRIENTE

Fórmula:

$$\Delta T_{ml-cc} = \frac{(T_{1-metanol} - T_{4-agua}) - (T_{2-metanol} - T_{3-agua})}{\ln \left( \frac{T_{1-metanol} - T_{4-agua}}{T_{2-metanol} - T_{3-agua}} \right)}$$

$\Delta T_{ml-cc} = 27.19918368$

#### CALCULO DEL AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA SUPERFICIE EXTERNA DEL TUBO INTERIOR

Diámetro externo tubo interior cédula 40 =	0.0630 m
Longitud del tubo	L = 1.5000 m
Area externa del tubo interior	$A = \pi * D^2 * L = 10.6028752$

#### CALCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Fórmula

$$U = \frac{Q_1}{A * \Delta T_{ml-cc}}$$

$U = 1.523765 \text{ kW}/(m^2 * °K)$

### 3.2.7 ALGORITMO

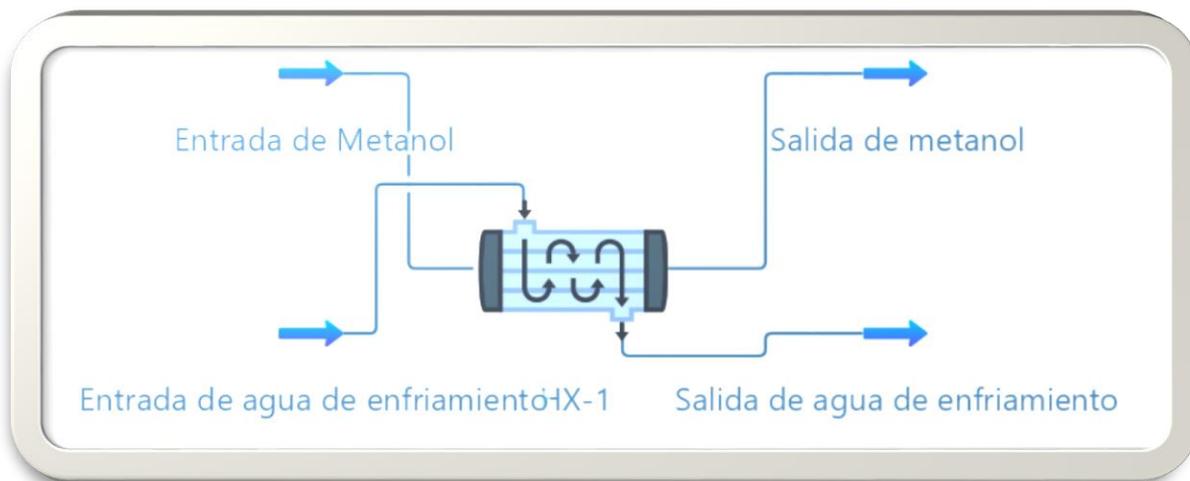
#### ALGORITMO EN SEUDOCODIGO

1. El usuario debe ingresar los datos de entrada y salida del fluido de proceso (Temperatura y flujo másico)
2. El usuario debe ingresar datos de entrada del agua de enfriamiento (Temperatura y flujo másico)
3. Seleccione las unidades en que ingresó la temperatura del agua caliente y de enfriamiento
4. Seleccione el diámetro nominal del tubo externo en pulgadas y se obtendrá automáticamente el diámetro nominal correspondiente al tubo interno
5. Seleccione la cédula de cada uno de los tubos
6. Una vez ingresados todos los datos de las tuberías se obtendrá rápidamente el diámetro interno del tubo interior, diámetro interno del tubo exterior y el diámetro externo del tubo exterior gracias a los datos de las tablas colocadas en la 'Base de datos'
7. Se obtiene con el modelo matemático 1 el calor cedido por la corriente caliente a las temperaturas que se requiere que entre y salga del proceso.
8. Una vez llenos todos los datos solicitados del fluido que cede calor y de los tubos que componen el intercambiador, se obtiene mediante gráficas y con la ecuación de ajuste de curvas el valor de algunas propiedades de los fluidos; se obtiene la viscosidad, densidad, calor específico, etc.
9. Con el calor cedido calculado, el cual se supone es igual al calor absorbido se obtienen dos variables desconocidas, en calor específico promedio de salida del fluido frío  $C_{pf1}$  y la temperatura de salida del fluido frío  $T_{f2}$ . Esto se resuelve mediante el cálculo iterativo de las variables que realiza excel, para obtener así la temperatura de salida del agua de enfriamiento.
10. El programa obtiene automáticamente, con el modelo matemático no. 10, la velocidad del fluido que transita en ambas corrientes y el valor de algunos números adimensionales, como el número de Prandtl (modelo 4 y 5), Nusselt (modelo 8 y 9) y Reynolds (modelo 6 y 7).
11. Se obtienen los coeficientes de película  $h_i$  y  $h_e$  para el fluido que transita en interior y exterior del tubo interno.
12. Por último, el programa obtiene el valor de la longitud del intercambiador que se requiere (L) del despeje del modelo matemático número 2.

### 3.2.8 RESULTADOS

RESULTADOS	
CALOR TRANSFERIDO Q =	439.43804 kW
MEDIA LOGARITMICA CONTRACORRIENTE	27.199184
AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR	10.602875 m <sup>2</sup>
COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR	1.5237655 kW/(m <sup>2</sup> *°K)

### 3.4 SIMULADOR EN DWSIM



HX-1 Heat Exchanger	
Coeficiente global de transferencia de calor (U)	1068.19 W/[m <sup>2</sup> .K]
Área de intercambio de calor (A)	10.6 m <sup>2</sup>
Heat Load	321.864 kW
Temperatura de salida del fluido frío	17.8482 C
Temperatura de salida del fluido caliente	35 C

### 4. CONCLUSION

Con los simuladores realizados podemos comprobar que es de mucha utilidad saber utilizar estos softwares en ingeniería química ya que son sencillos de hacer y tienen mucha precisión a la hora de correrlos.

La simulación permite realizar pruebas de funcionamiento y cambio en los procesos que de otra manera podrían llegar a ser peligrosos, costosos o lentos.

Excel tiene mas precisión en los cálculos ya que son utilizados con datos experimentales a comparación de DWSIM lo calcula a partir de correlaciones teóricas, pero es mas rápido realizar un simulador en DWSIM.

## **5. FUENTES DE INFORMACION**

- ROBERT H. PERRY, DON W. GREEN. (2012). MANUAL DEL INGENIERO QUÍMICO. 7ª ED. INTERAMERICANA DE ESPAÑA. MCGRAW HILL.
  
- DR. NICOLÁS JOSÉ SCENNA, MODELADO, SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS QUÍMICOS. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, ARGENTINA.
  
- DONALD Q. KERN. (1999) PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR. 1ª ED. (TRIGÉSIMA PRIMERA REIMPRESIÓN). MÉXICO. MCGRAW HILL.
  
- CHRISTIE JOHN GEANKOPLIS. (2006). PROCESOS DE TRANSPORTE Y PRINCIPIOS DE PROCESOS DE SEPARACIÓN. 4ª ED. UNIVERSIDAD DE MINNESOTA. PEARSON EDUCATION.
  
- J. M. SMITH, H. C. VAN NESS, M. M. ABBOTT. INTRODUCCIÓN A LA TERMODINÁMICA. 7ª ED. UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA. MCGRAW HILL.