

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE  
INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA EN PLANTAS DE  
GAS NATURAL**

**COLMENARES VEGA HERNÁN MAURICIO  
MORENO SÁNCHEZ CARLOS ALBERTO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2020**

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE  
INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA EN PLANTAS DE  
GAS NATURAL**

**COLMENARES VEGA HERNÁN MAURICIO  
MORENO SÁNCHEZ CARLOS ALBERTO**

**Trabajo presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero de  
Petróleos.**

**Director:**

**M Sc. MANUEL ENRIQUE CABARBAS SIMANCAS  
Docente Escuela de Ingeniería de Petróleos, UIS  
Magister en ingeniería química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2020**

## DEDICATORIA

*Carlos,*

Primeramente, a Dios por guiarme y bendecirme en cada momento no solo durante mi trayectoria para llegar a ser profesional sino en cada paso de mi vida.

A mi padre, Carlos Moreno Guarín, quien, con trabajo arduo, empeño, paciencia y dedicación me inculcó siempre valores y me enseñó a luchar por todo aquello que quisiera en mi vida, aunque en estos momentos no se encuentre a mi lado físicamente siempre me estará guiando en cada paso y decisión a lo largo de mi vida.

A mi madre, Rubiela Sánchez Pinzón quien siempre me brindó su apoyo incondicional que ha sido mi motor al igual que mi padre, por todo su amor y su comprensión en cada aspecto de mi vida.

A mi hermana, Margith Lizeth Moreno Sánchez que ha estado a mi lado en cada logro de mi vida brindándome su apoyo y su amor y toda su alegría para seguir avanzando cada vez más a nivel profesional y personal.

A mi novia, porque ha sido un gran apoyo a lo largo de todos los años que siempre ha creído en mí y ha estado a mi lado en los buenos y malos momentos para brindarme su apoyo y superar cualquier obstáculo.

*Mauricio,*

A Dios por darme discernimiento, sabiduría, salud y fuerza en cada uno de mis pasos con el fin de lograr mis metas

A mi mamá por ser mi concejera de vida, por ser un pilar fundamental en toda mi formación académica, además por su confianza que me ayudó a ser perseverante, sin ella nada sería posible

A Laura, mi novia, quien sirvió como bastón en este proceso y me brindó todo su apoyo, cariño y confianza sin esperar nada a cambio

## AGRADECIMIENTOS

*Carlos,*

A mi familia, por ser mi modelo a seguir en cada aspecto de mi vida, por brindarme su total apoyo e inculcar los valores para llegar a ser la persona que soy ahora.

A mi padre, Carlos Moreno Guarín, por todo su esfuerzo, su amor y cada enseñanza que me dejó en vida y que aun desde el cielo me sigue cuidando y brindando su apoyo en cada paso de mi vida.

A mi madre, Rubiela Sánchez Pinzón, por ser una mujer extremadamente fuerte, por los valores que inculcó en mí para llegar a ser la persona que soy hoy en día.

A mi hermana, Margith Lizeth Moreno Sánchez, por ser una persona soñadora, emprendedora y leal, que son cualidades maravillosas y se transmiten con su grandiosa personalidad, y me impulsa a ser mejor cada día.

A Camila Morales, Laura Grandas y Guty por su amistad incondicional y son la prueba de que los verdaderos amigos están siempre sin importar la distancia y las circunstancias.

*Mauricio,*

A la Universidad Industrial de Santander por ser mi segunda casa, a mis profesores y amigos que me ayudaron en mi formación personal y profesional.

Al Ingeniero Manuel Enrique Cabarcas Simancas por su tiempo y su confianza, gracias a sus consejos y sus enseñanzas que fueron de gran ayuda para culminar este proyecto.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	211
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	22
1.1 DEFINICIÓN DE INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	22
1.1.1 Convección: .....	22
1.1.2 Radiación: .....	23
1.1.3 Conducción: .....	23
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR .....	24
1.2.1 Clasificación según la forma en que el calor es transferido. ....	24
1.2.2 Clasificación según la trayectoria de sus fluidos.....	25
1.2.3 Clasificación según sus características de construcción .....	28
2. INTEFCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA .....	30
2.1 CABEZALES.....	34
2.1.1 Cabezal estacionario. ....	34
2.1.2 Cabezal posterior.....	35
2.2 BAFFLES O DEFLECTORES.....	35
2.3 CORAZA.....	38
2.3.1 Tipos de corazas.....	38
2.4 HAZ DE TUBOS .....	40
2.4.1 Arreglo de los tubos. ....	40
2.4.2 Paso.....	42
3. DISEÑO PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA...	43
3.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS .....	43
3.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL SISTEMA .....	43
3.3 CÁLCULO DE LA LMTD .....	44
3.4 CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA LMTD (F): .....	44

3.5 ESQUEMA DE ITERACIÓN A PARTIR DE LA SUPOSICIÓN DEL U .....	45
3.6 CÁLCULO DEL ÁREA A PARTIR DE UN U SUPUESTO.....	47
3.7 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO TOTAL DE TUBOS NTT .....	47
3.8 CÁLCULO DE VELOCIDAD DE FLUIDO EN LOS TUBOS .....	47
3.9 PASO ENTRE TUBOS ( $L_{tp}$ ) .....	47
3.10 CÁLCULO DEL DOTL.....	48
3.11 CÁLCULO DEL $L_{bbt}$ .....	49
3.12 DISTANCIA MINIMA ENTRE EL BAFLE.....	49
3.13 CÁLCULO DEL DCTL.....	50
3.14 CÁLCULO DE LAS ÁREAS SM (MÍNIMA), SBP (DE BY PASS).....	50
3.15 CÁLCULO DEL REYNOLDS EN EL CASCO .....	51
3.16 CÁLCULO DEL ESPACIO ENTRE EL BAFLE Y EL CASCO EN LA VENTANA .....	51
3.17 CÁLCULO DE LOS FACTORES J.....	51
3.18 NÚMERO DE FILAS EFECTIVAS EN LA VENTANA .....	51
3.19 ESPACIAMIENTO DE BAFLE .....	52
3.20 FACTOR DE FUGAS $J_I$ .....	52
3.21 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN IDEAL $H_I$ .....	52
3.22 CÁLCULO FACTORES DE CORRECCIÓN .....	53
3.23 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.....	53
3.24 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CALOR INTERNO $H_{int}$ .....	53
3.25 RESISTENCIA DE LA PARED .....	54
3.26 CÁLCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL $U_{cal}$ .....	54
3.27 COMPARACIÓN E ITERACIÓN .....	54
3.28 CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN EN TUBOS Y CORAZA .....	54
3.28.1 En los tubos. ....	55
3.28.2 En la coraza. ....	55
4. INTERFAZ DEL SOFTWARE .....	57

5. OTROS TIPOS DE SOFTWARE .....	66
6. VALIDACIONES .....	68
7. CONCLUSIONES .....	73
RECOMENDACIONES .....	77
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Convección .....	23
Figura 2. Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta x$ y área A. ....	24
Figura 3. Flujo en paralelo .....	26
Figura 4. Flujo en contracorriente .....	27
Figura 5. Flujo cruzado (no mezclado).....	27
Figura 6. Flujo cruzado (mezclado).....	38
Figura 7. Intercambiador de cabezal flotante interno (AES) .....	31
Figura 8. Intercambiador de lámina y tubo fijo .....	32
Figura 9. Intercambiador de cabezal flotante exterior .....	32
Figura 10. Intercambiador de cabezal y tubos integrados .....	33
Figura 11. Corte del deflector.....	36
Figura 12. Orientación de los deflectores .....	37
Figura 13. Tipos de coraza y cabezales según TEMA.....	39
Figura 14. Tipos de arreglo de tubos .....	41
Figura 15. Pitch.....	42
Figura 16. DOTL .....	57
Figura 17. Pantalla principal del software. ....	58
Figura 18. Formulario de selección de fluidos y concentración .....	58
Figura 19. Ventana de composición del gas .....	59
Figura 20. Ventana de balance de energía.....	59
Figura 21. Propiedades de los fluidos seleccionados .....	62
Figura 22. Gráficas de propiedades del DEG .....	63
Figura 23. Temperatura media logarítmica y ubicación de los fluidos. ....	63
Figura 24. Datos de la tubería.....	64
Figura 25. Selección de cabezales y coraza.....	66

Figura 26. Resultados.....62  
Figura 27. Caida de presión en tubos y coraza .....62

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Criterios de la orientación del corte del baffle .....	37
Tabla 2. Tipos de deflectores.....	38
Tabla 3. Recommended tube layout pitch dimensions by U.S. practice (inch based); pitch ratio $Ltp/Dt$ . <i>Handboock</i> .....	48
Tabla 4. Validación de resultados DEG-MEA .....	699
Tabla 5. Validación de resultados MEG-TEG .....	70
Tabla 6. Validación de resultados Hidrocarburo liquido-MEG.....	70
Tabla 7. Validación de resultados gas-MEA .....	71

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A: TABLA DE DIAMETROS DE TUBERIA SEGÚN TEMA (TABLA RCB-7.21).....	77
ANEXO B: MANUAL DE USUARIO.....	77

## GLOSARIO

$A_{int}$  = Área interna, ( $mm$ )

$A_{ext}$  = Área externa, ( $mm$ )

$A_{t_{trans}}$  = Área transversal del tubo, ( $m^3$ )

$BC$  = Corte del bafle, (%)

$C_p$  = Calor específico, ( $\frac{BTU}{lbm \cdot ^\circ F}$ )

$den$  = Densidad, ( $Kg/m^3$ )

$DS$  = Diámetro interno de la coraza, ( $mm$ )

$Dt$  = Diámetro externo del tubo, ( $mm$ )

$F_{sbp}$  = Relación entre el área de bypass y el área de flujo cruzado.

$F_w$  = Fracción de tubos en una ventana de bafle, (*Adimensional*)

$h_{ext}$  = Coeficiente de calor por convección, ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ )

$h_i$  = Coeficiente de calor interno, ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ )

$L_{bb}$  = Distancia existente entre el diámetro interior de la coraza y el diámetro externo del haz de tubos, ( $mm$ )

$L_{bc}$  = Distancia mínima entre bafles, ( $mm$ )

$L_{bch}$  = Altura del corte del bafle, ( $mm$ )

$LMTD$  = Temperatura media logarítmica, (*Adimensional*)

$L_{tp}$  = Paso entre tubos, (*Adimensional*)

$L_{ti}$  = Longitud del tubo, ( $mm$ )

$L_{tp}$  = Paso de la disposición de los tubos, ( $mm$ )

$L_{ts}$  = Espesor de la placa de tubos, ( $mm$ )

$m$  = Flujo masico, ( $lbm / hora$ )

$m_s$  = Flujo másico del lado de la coraza, ( $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$ )

$N_b$  = Número de bafles, (*Adimensional*)

$N_{PT}$  = Número de pasos por tubo, (*Adimensional*)

$N_{TT}$  = Número total de tubos, (*Adimensional*)

$NTW$  = Número de tubos en una ventana de bafle, (*Adimensional*)

$NT_{cc}$  = Número de filas de tubos efectivas en flujo cruzado, (*Adimensional*)

$Q$  = Duty del proceso, ( $\frac{BTU}{hora}$ )

$Res$  = Número de Reynolds, (*Adimensional*)

$R_p$  = Resistencia de la pared, ( $\frac{W}{m^2 \cdot k}$ )<sup>-1</sup>

$S_w$  = Área total de la ventana, ( $mm^2$ )

$S_{bp}$  = Área de bypass, ( $mm^2$ )

$T_1$  = Temperatura de entrada del fluido frío, ( $^{\circ}F$ )

$T_2$  = Temperatura de salida del fluido frío, ( $^{\circ}F$ )

$tt_1$  = Temperatura de entrada del fluido caliente, ( $^{\circ}F$ )

$tt_2$  = Temperatura de salida del fluido caliente, ( $^{\circ}F$ )

$V_t$  = Velocidad en los tubos, ( $m/s$ )

## RESUMEN

**TITULO:** DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA EN PLANTAS DE GAS NATURAL

**AUTORES:** COLMENARES VEGA HERNAN MAURICIO  
MORENO SÁNCHEZ CARLOS ALBERTO

**PALABRAS CLAVE:** SOFTWARE, INTERCAMBIO DE CALOR, AMINAS, GLICOLES, INGENIERÍA DE GAS

### **DESCRIPCIÓN:**

En la actualidad, en todas las áreas del desarrollo industrial se generan nuevos retos los cuales necesitan de soluciones rápidas y acertadas, para lo cual los profesionales que se están formando requieren de nuevas herramientas y métodos de aprendizaje los cuales les brinden una mejor comprensión de los desafíos a los cuales se enfrentaran a nivel profesional, de una forma más didáctica. Fundamentos teóricos y prácticos sustentan el uso de un software pedagógico en los procesos de enseñanza y aprendizaje como un medio que permite un mayor despliegue de los recursos cognitivos de los alumnos. En la Industria de Oil & Gas se encuentran diferentes tipos de software para el diseño de equipos y simulaciones de procesos, no obstante, estos tipos de software requieren de un conocimiento previo de su uso.

El presente trabajo, muestra un software didáctico para el diseño de intercambiadores de calor de tubos y coraza en plantas de gas natural para estudiantes de pregrado de Ingeniería de Petróleos. Este software ha sido diseñado para complementar el aprendizaje de una forma más visual e interactiva para los estudiantes.

## **ABSTRACT**

**TITLE:** DEVELOPMENT OF A PEDAGOGICAL SOFTWARE FOR THE DESIGN OF SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS IN NATURAL GAS

**AUTHORS:** COLMENARES VEGA HERNAN MAURICIO  
MORENO SÁNCHEZ CARLOS ALBERTO

**KEYWORDS:** SOFTWARE, HEAT EXCHANGER, AMINES, GLYCOLS, GAS ENGINEERING.

### **DESCRIPTION:**

Currently, in all areas of industrial development, new challenges are generated which need quick and accurate solutions, for which the professionals who are being trained require new tools and learning methods which provide them with a better understanding of the challenges that they will face at a professional level, in a more didactic way. Theoretical and practical foundations support the use of pedagogical software in the teaching and learning processes as a means that allows a greater deployment of students' cognitive resources. In the Oil and Gas Industry there are different commercial software for the design of equipment and process simulations, however, said software affected by prior knowledge of its use.

The present work shows a didactic software for the design of tube and shell heat exchangers in natural gas plants for undergraduate students of Petroleum Engineering. This software has been designed to complement learning in a more visual and interactive way for students.

## INTRODUCCIÓN

Desde los comienzos de la industrialización el hombre ha intentado optimizar cada uno de los logros en sus avances tecnológicos, dentro de los cuales, el estudio y la comprensión de los equipos, ha jugado un papel importante, a fin de satisfacer y mejorar el desempeño de los diferentes procesos.

Uno de los procesos más estudiados y de continuo análisis en busca de un mejor rendimiento a escala industrial, ha sido el proceso de transferencia de calor.

Existen gran variedad de equipos para la transferencia de calor, dentro de los cuales destacan los intercambiadores de calor, dichos equipos tienen como función transferir el calor entre dos corrientes que se encuentran a niveles de temperatura diferentes. Dentro de estos equipos de transferencia de calor, existen los llamados intercambiadores de calor de tubos y coraza, que son los más utilizados en el área de tratamiento del gas natural.

Con el constante avance tecnológico, se ha requerido buscar nuevas formas de facilitar el aprendizaje y conocimiento de estos equipos. Para ello, se ha decidido crear un software pedagógico con el fin de que los estudiantes de ramas afines con el proceso de la transferencia de calor y específicamente para todo lo relacionado con los equipos de intercambio de calor del tipo Tubos y Coraza puedan de forma sencilla, tener un mayor conocimiento del diseño de dichos equipos.

## 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 1.1 DEFINICIÓN DE INTERCAMBIADOR DE CALOR

Un intercambiador de calor, es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fuentes o fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes, evitando el contacto entre ellos, lo cual se logra a través de una pared.

La transferencia de calor suele comprender diferentes mecanismos como lo son convección en cada uno de los fluidos, conducción a través de la pared que los separa y en algunas ocasiones radiación para el caso de los gases.

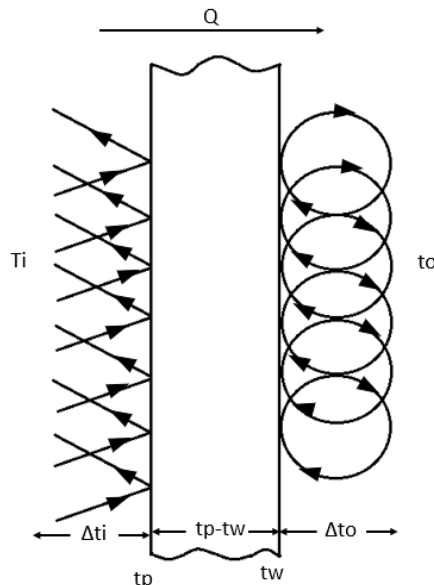
#### 1.1.1 Convección:

“Es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento, y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido sea el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección”<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> CENGEL, Yunus A., Op. Cit. P. 25

**Figura 1. Convección**



Fuente: Donald Kern, Procesos de transferencia de calor

**1.1.2 Radiación:** “Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. La transferencia de energía por radiación es la más rápida y no sufre atenuación en el vacío”<sup>2</sup>. Además, este tipo de transferencia de energía no requiere de intervención alguna de un medio, ya que puede ser transmitido a través del vacío absoluto.

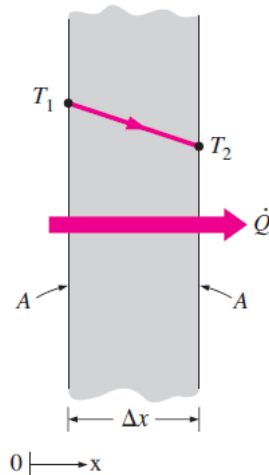
**1.1.3 Conducción:** “Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. Esta tiene lugar en los sólidos, líquidos, y gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio y en los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas”<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> Ibídem, P. 27

<sup>3</sup> CENGEL, Yunus A. transferencia de calor, segunda edición, México: Mcgraw Hill 1998. P.17

**Figura 2. Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor  $\Delta x$  y área  $A$ .**



Fuente: Yunus Cengel, transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, 4ta edición.

## 1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Existen diferentes tipos de equipos de transferencia de calor y se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Clasificación según la forma en que el calor es transferido.
- Clasificación según la trayectoria de sus fluidos.
- Clasificación según su aplicación.

**1.2.1 Clasificación según la forma en que el calor es transferido.** Según la forma en que el calor es transferido, los equipos se dividen en:

- Regeneradores. En este equipo, los fluidos se mueven a través de él y utilizan la misma vía de forma alterna. Una vez el fluido caliente recorre el cuerpo del intercambiador, este absorbe el calor que es cedido cuando pasa el fluido frío. En los diversos tipos de intercambiadores, los fluidos que circulan a través de él,

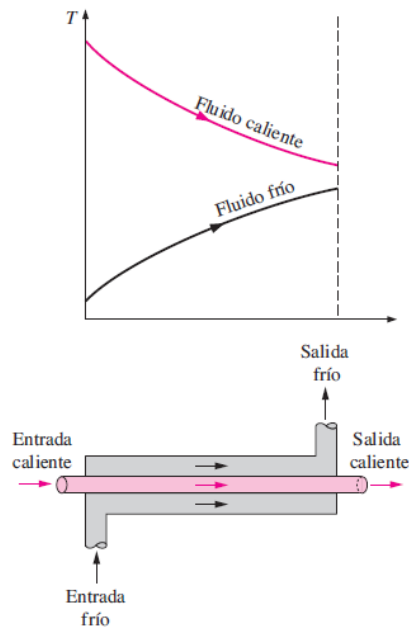
se encuentran separados por una pared sólida, mientras que un regenerador, es un intercambiador en el cual el mismo espacio es ocupado alternativamente por los gases calientes y fríos entre los cuales se da el intercambio de calor.

- Intercambiadores de calor de tipo cerrado. Este tipo de intercambiadores, permite que la transferencia de calor se realice a través del cuerpo o estructura que separa los dos flujos. Esta estructura o cuerpo puede ser una placa, un tubo o una pared que sencillamente evita el contacto entre los dos fluidos.
- Intercambiadores de calor de tipo abierto. Este tipo de intercambiadores, se diferencia de los dos anteriores, debido a que el intercambio de calor se genera permitiendo que los fluidos tengan un contacto directo entre ellos.

**1.2.2 Clasificación según la trayectoria de sus fluidos.** Conforme a la trayectoria que tiene cada uno de los fluidos que ingresan al proceso, los equipos pueden dividirse en:

- **Flujo en paralelo:** En este caso, los fluidos frío y caliente, ingresan al intercambiador por el mismo extremo de la unidad, fluyen a través del mismo, en una misma dirección y salen por el otro extremo del equipo. Como se puede observar a continuación (figura 3) la diferencia de temperatura es grande al comienzo del proceso, y decae a medida que aumenta la distancia recorrida por los fluidos.

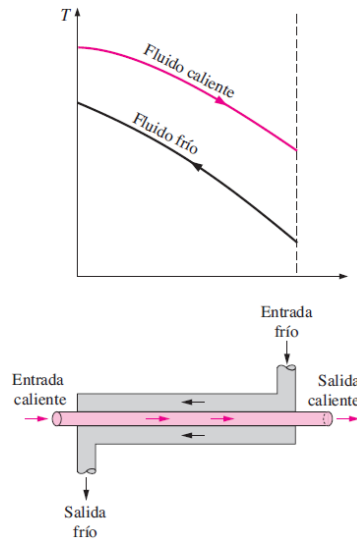
**Figura 3. Flujo en paralelo**



Fuente: Yunus Cengel, transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, 4ta edición

- **Flujo en contracorriente:** En este caso, los fluidos caliente y frío ingresaran por extremos opuestos del equipo y fluyen en direcciones opuestas. A diferencia del flujo en paralelo, en esta configuración el contraste de temperaturas con respecto a la distancia no es significativamente grande en comparación con el flujo en paralelo, como se puede observar a continuación.

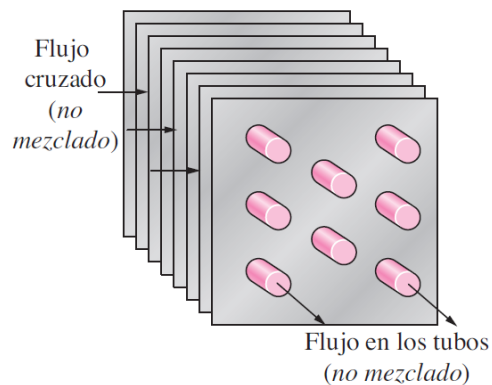
**Figura 4. Flujo en contracorriente**



Fuente: Yunus Cengel, transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, 4ta edición

- **Flujo cruzado (no mezclado):** Como se puede observar en la figura 5, se dice que el flujo es no mezclado, cuando, por ejemplo, las aletas de placa fuerzan al fluido a moverse por un espacio, en particular entre ellas; por ende, impide que el fluido que circula fuera de los tubos, fluya en dirección transversal a los tubos.

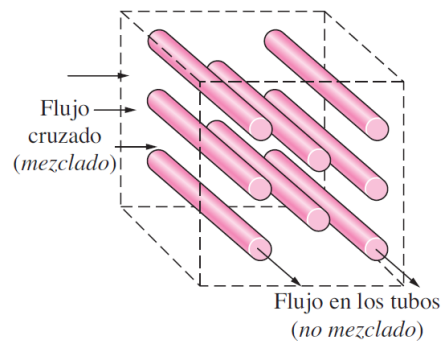
**Figura 5. Flujo cruzado (no mezclado)**



Fuente: Yunus Cengel, transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, 4ta edición.

- **Flujo cruzado (mezclado):** Se dice que el flujo es mezclado, cuando el fluido que se encuentra fuera de los tubos tiene libertad para moverse en dirección transversal a los tubos, como se muestra en la figura 6.

**Figura 6. Flujo cruzado (mezclado)**



Fuente: Yunus Cengel, transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones, 4ta edición

**1.2.3 Clasificación según sus características de construcción** Los intercambiadores de calor más comunes según sus características de construcción, son los siguientes:

- **Intercambiadores de calor de placas.** Este tipo de intercambiadores, consiste en una estructura de placas metálicas corrugadas y ensambladas a presión, las cuales forman el área requerida para la transferencia de calor, con orificios orientados a la disposición del flujo.
- **Intercambiadores de calor de tipo tubo espiral.** Este intercambiador se compone de una o más bobinas con forma espiral ubicadas dentro de un depósito. Este tipo de intercambiador, puede generar una mayor tasa de transferencia de energía, pero con el inconveniente de tener una mayor dificultad en su limpieza.

- **Intercambiadores de calor de tubos y coraza.** Este tipo de intercambiadores, consiste en un arreglo de tubos ubicado dentro de una coraza o casco, en el cual se transfiere energía entre dos fluidos, entre los cuales no hay contacto, siendo separados por una pared de tubo. Los intercambiadores de tubos y coraza, son los más comunes para usos industriales, por su facilidad para la limpieza y controlar la corrosión. Adicional a esto, soportan presiones relativamente altas.
- **Intercambiadores de calor tubular.** Este tipo de intercambiadores, cuenta con una formidable flexibilidad en el diseño, debido a que su geometría puede variar fácilmente al cambiar el diámetro del tubo, su longitud y posición. Se pueden utilizar cuando se emplean líquidos con cambio de fase (evaporación y condensación).

## **2. INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA**

Un intercambiador de tubos y coraza, se compone de un recipiente cilíndrico a presión llamado coraza o casco, que contiene una determinada cantidad de tubos llamado haz de tubos.

En este, uno de los fluidos circula por el interior de los tubos y el otro, circula fuera de los tubos y dentro de la coraza. Esto con la finalidad de que el intercambio de calor, se lleve a cabo sin que los fluidos se mezclen y ocurre por medio de la conducción y la convección.

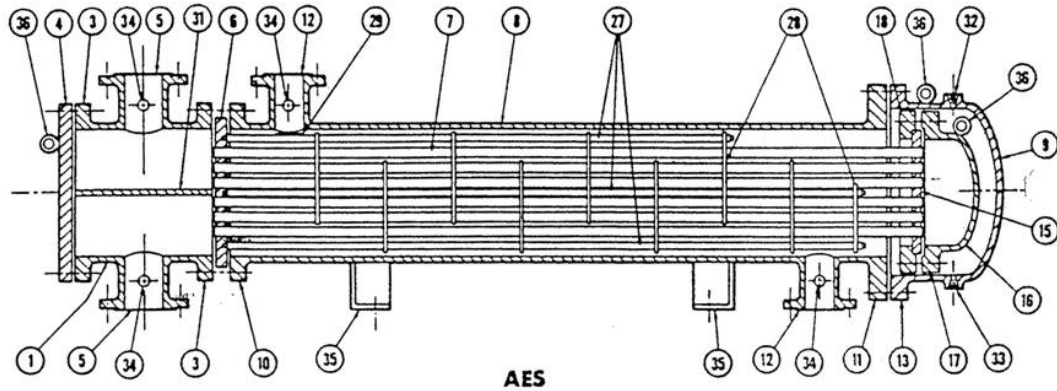
Existen 3 tipos básicos de intercambiadores de calor de tubos y coraza, y su construcción está regida por la normatividad TEMA (Tubular Exchangers Manufacturers Assosiation). Los tipos básicos de intercambiadores son: Cabezal fijo, cabezal flotante y tubos en U.

Estos equipos proporcionan grandes áreas para la transferencia de calor. Gracias a su configuración del haz de tubos que suelen ocupar lugares pequeños, se pueden manejar fluidos en cualquier estado, con un fácil desmontaje y limpieza; además, brindan un buen rendimiento a altas presiones y temperaturas a las cuales opera. Sin embargo, ocupa un mayor espacio que el intercambiador de calor de placas.

Existen algunos tipos de intercambiadores de calor de tubos y coraza básicos según la TEMA, los cuales se presentan a continuación:

- **INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE INTERNO (tipo AES)**

**Figura 7. Intercambiador de cabezal flotante interno (AES)**

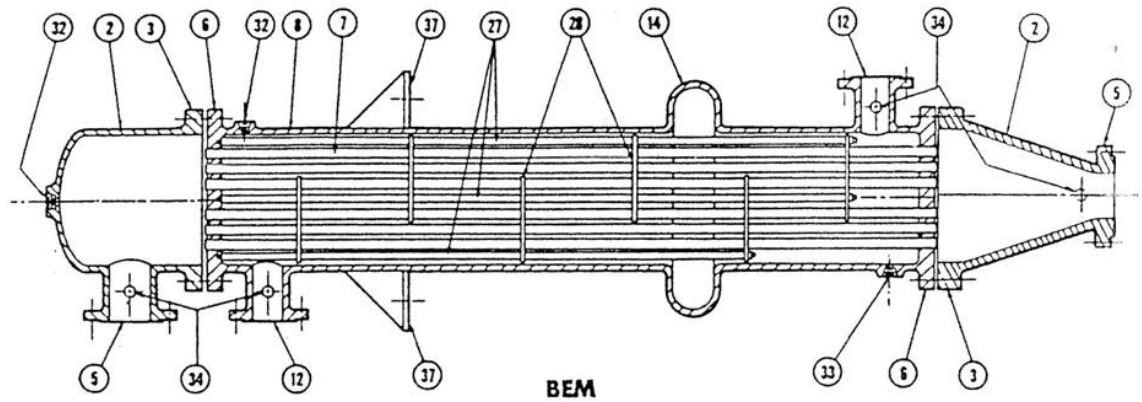


Fuente: TEMA floating head heat exchanger. (Fig. 21) (Copyright, Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1988.)

Este tipo de intercambiador de tubos y coraza, es el más común y permite una expansión térmica de los tubos respecto a la coraza. Tiene un paso en coraza y puede tener 4, 6 y 8 pasos, y puede manejar tanto flujo a co-corriente como contracorriente.

- **INTERCAMBIADOR DE LAMINA Y TUBO FIJO (BEM)**

**Figura 8. Intercambiador de lámina y tubo fijo**

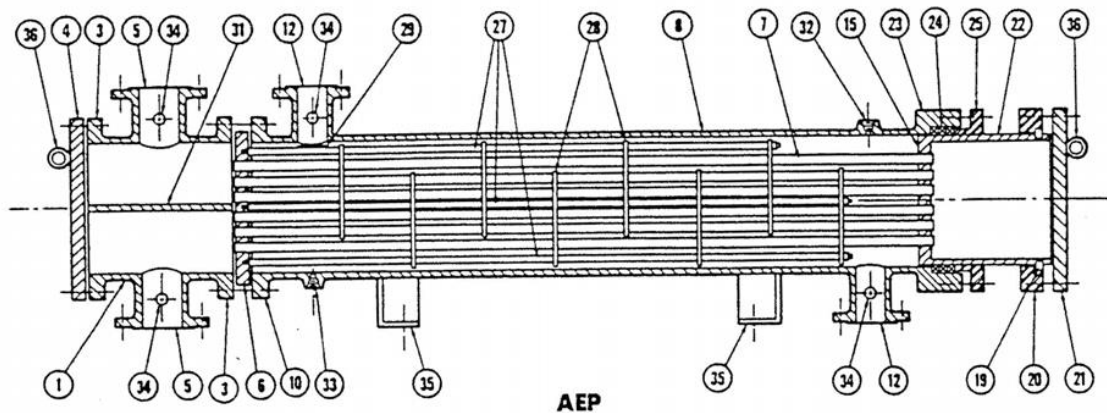


Fuente: TEMA (Copyright, Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1988.)

Este intercambiador posee solo un paso en tubo y coraza, lo cual limita la velocidad a la cual fluye el fluido dentro de los tubos, reduciendo así la transferencia de calor, y no es posible su desmontaje para limpieza en el lado de la coraza.

- **INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE EXTERIOR (AEP)**

**Figura 9. Intercambiador de cabezal flotante exterior**

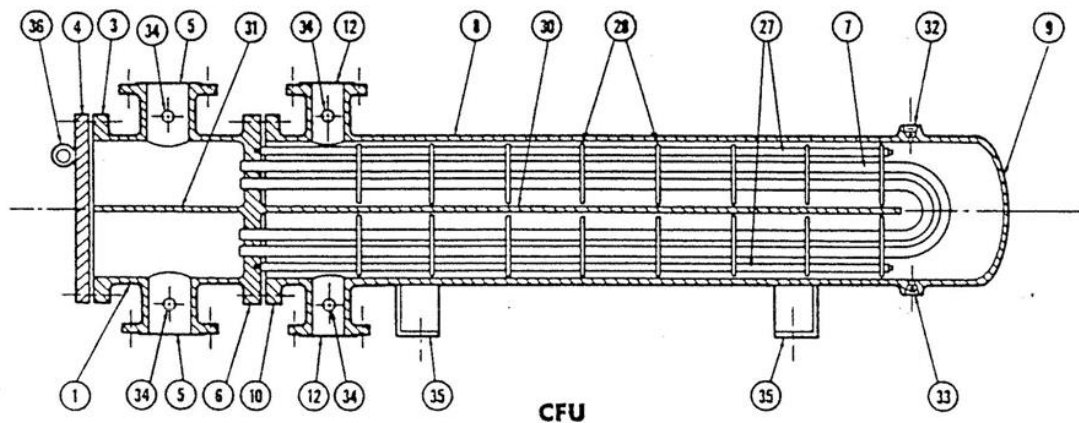


Fuente: TEMA (Copyright, Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1988.)

Este modelo, posee la facilidad de desmontaje del cabezal flotante, para su mantenimiento, pero requiere de un mayor mantenimiento para evitar fugas.

- **INTERCAMBIADOR DE CABEZAL Y TUBOS INTEGRADOS (CFU)**

**Figura 10. Intercambiador de cabezal y tubos integrados**



Fuente: TEMA U-tube heat exchanger. (Copyright, Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1988.)

A diferencia de los demás tipos de intercambiadores de tubos y coraza, este posee un haz de tubos en forma de U, por ende, permite un desmontaje fácil del haz; sin embargo, tiene el inconveniente al momento de sustituir un tubo que se encuentre dañado.

Los intercambiadores de calor de tubos y coraza poseen unas partes básicas las cuales son:

- Cabezales
- Baffles o deflectores
- Coraza
- Haz de tubos

## 2.1 CABEZALES

La mayoría de intercambiadores de calor, poseen dos cabezales ubicados en los extremos de la coraza, a excepción de los tubos en U, los cuales solo poseen un cabezal.

Los dos tipos de cabezales existentes son:

- Cabezal estacionario
- Cabezal posterior

**2.1.1 Cabezal estacionario.** El cabezal estacionario es el medio por el cual entra el fluido que va a circular dentro de los tubos, y van apernados a la coraza para así permitir un fácil y rápido acceso a los componentes internos que conforman el intercambiador, para realizar las tareas de inspección y limpieza.

Se tiene 3 tipos de cabezales posteriores que son:

- Canal apernado. Este canal está compuesto por un barril cilíndrico con bridas en los extremos, con una de ellas sujeta a la placa de tubos fija, y la otra a la cubierta plana.
- Canal soldado. Para casos en los cuales se tienen altas presiones, es preciso restringir el número de juntas externas, razón por la cual, el barril deberá ser soldado a la placa de tubos fija o a la coraza.

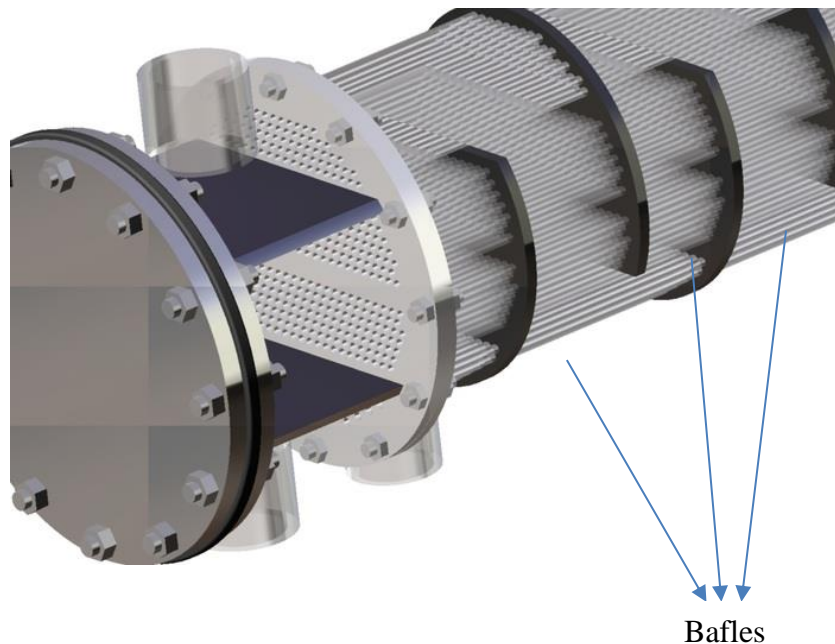
Es indispensable que exista un espacio entre los tubos y la coraza que permita realizar un adecuado mantenimiento y limpieza.

- Bonete o cabeza enteriza. En este cabezal, la cubierta tiene una forma curva la cual va soldada al barril cilíndrico. A su vez, este cabezal posee un costo menor comparado con los dos anteriores.

Para remover este cabezal, se requiere romper las bridas que conectan la tubería de las boquillas, por ende, es ensamblada en el extremo estacionario cuando no se requiere de limpieza con frecuencia.

**2.1.2 Cabezal posterior.** Este cabezal posee los mismos componentes del estacionario. Sus boquillas pueden ir soldadas o no, esto depende del número de pasos en los tubos. Se pueden utilizar los tipos de cabezal estacionario en el lugar del posterior.

## 2.2 BAFLES O DEFLECTORES

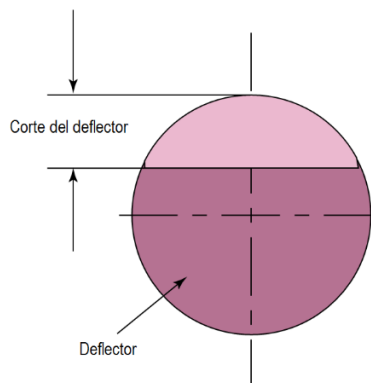


Los baffles, son una serie de placas espaciadas y localizadas en el interior de la coraza del intercambiador de calor. Dichos baffles tienen una ventana por la cual el fluido que ingresa del lado de la coraza fluye y recorre el intercambiador. Esta ventana es también conocida, como corte de baffle el cual varía generalmente entre el 20 % y 40% en baffles segmentados simples y un 20% a 30% en baffles segmentados dobles.

Los Baffles cumplen dos funciones fundamentales; una de ellas es brindar soporte al haz de tubos que se encuentra ubicado dentro de la coraza, para así prevenir o mitigar la vibración y pandeo que se puede generar, debido a la turbulencia que pueden generar los fluidos que pasan a través del intercambiador. Adicional a esto, conduce el fluido que recorre la coraza, a través de el corte del baffle. Los baffles pueden ir orientados tanto de forma vertical como horizontal.

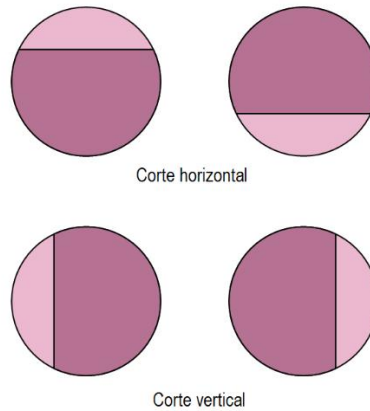
La separación recomendada para los baffles, se encuentra entre 0,2 a 1 veces el diámetro interno de la coraza. A su vez, se debe tener en cuenta que entre menor sea el espaciamiento entre los baffles, mayor será el coeficiente de transferencia de calor, pero se tendrá una mayor caída de presión, del lado de la coraza.

**Figura 11. Corte del deflector**



Fuente: Diapositivas MSc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas.

**Figura 12. Orientación de los deflectores**



Fuente: Diapositivas MSc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas.

A continuación, se mostrarán algunos criterios que se pueden tener en cuenta en el momento de seleccionar la orientación del corte de los deflectores.

**Tabla 1. Criterios de la orientación del corte del bafle**

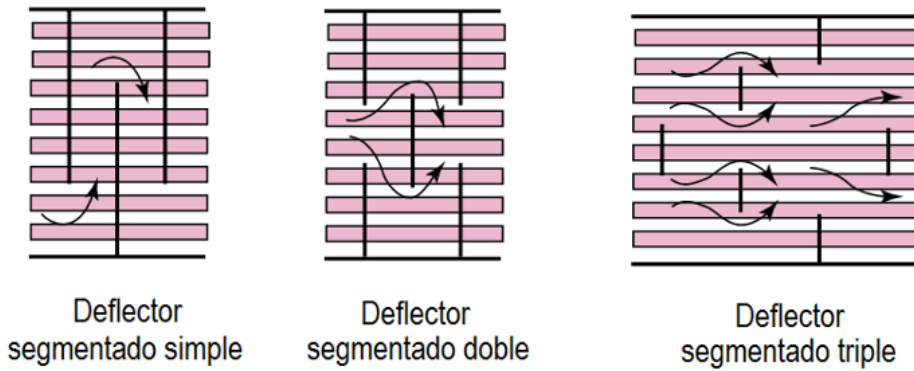
Servicio	Orientación del corte de los deflectores	Observaciones
<b>Una fase – Fluido limpio</b>	Cualquiera – La horizontal es la más común	----
<b>Una fase – Fluido sucio</b>	Vertical	Previene sedimentos Permite condensar el flujo libremente
<b>Condensación</b>	Vertical	
<b>Vaporización</b>	Cualquiera	La orientación horizontal previene la estratificación

Fuente: Diapositivas MSc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas.

Los deflectores se clasifican en 3 tipos básicos:

- Segmentado simple
- Segmentado doble
- Segmentado triple

**Tabla 2. Tipos de deflectores**



Fuente: Diapositivas MSc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas.

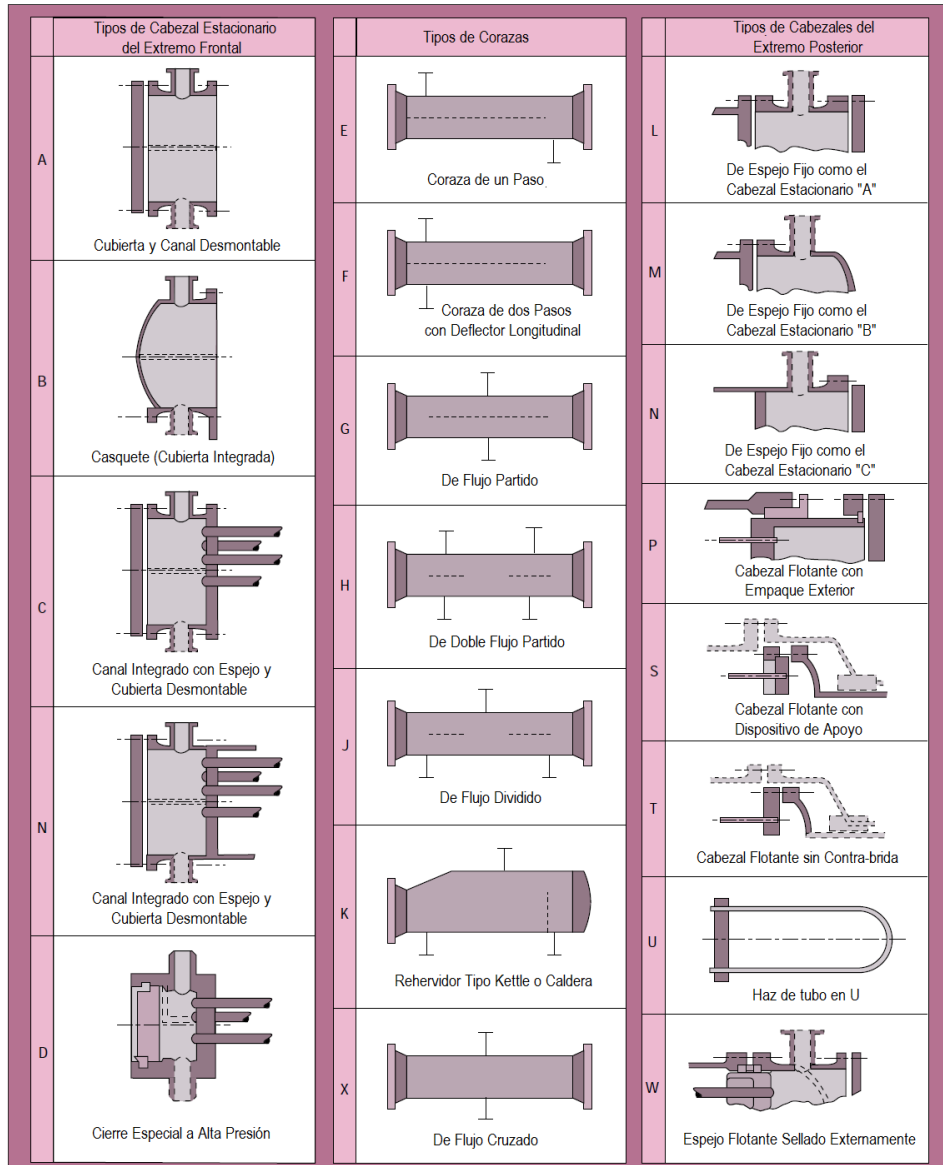
## 2.3 CORAZA

La coraza, carcasa o casco del intercambiador, es un contenedor cilíndrico dentro del cual se encontrarán el haz de tubos y los fluidos que generarán el intercambio de calor.

Los tipos de coraza que existen, al igual que los cabezales son diseñados en base a los estándares de la normatividad TEMA.

**2.3.1 Tipos de corazas.** Según la normatividad TEMA los tipos de coraza se muestran a continuación:

**Figura 13. Tipos de coraza y cabezales según TEMA**



Fuente: Diapositivas MSc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas.

(Copyright, Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1988.)

Las corazas más comunes son:

- CORAZA TIPO E. Esta coraza, es el más común debido a su bajo costo y facilidad de fabricación. Generalmente tiene un paso por coraza. Del lado de los

tubos puede tener un paso o múltiples pasos. Los tubos están soportados por deflectores transversales. Esta coraza es la más común para aplicaciones que involucren fluidos monofásicos.

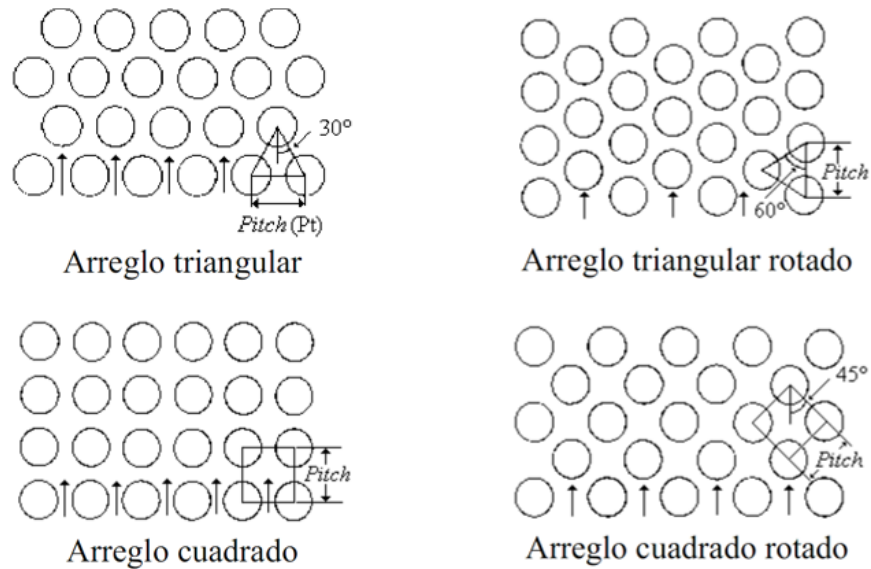
- **CORAZA TIPO F.** Esta coraza se utiliza, cuando se requiere un flujo en contra corriente. La cantidad de calor que se transfiere es mayor que en una coraza tipo E, pero se tendrá una mayor caída de presión.
- **CORAZA TIPO G.** Este tipo de coraza se conoce como intercambiador de flujo dividido, el cual generalmente posee un deflector longitudinal y una boquilla central tanto de entrada como de salida. Una vez el fluido ingresa por la boquilla este se divide en dos corrientes.

## **2.4 HAZ DE TUBOS**

**2.4.1 Arreglo de los tubos.** El arreglo de los tubos, es la disposición que llevarán los tubos que se encuentran dentro de la coraza del intercambiador. Los tipos de arreglos más comunes son:

- Arreglo triangular
- Arreglo triangular rotado
- Arreglo cuadrado
- Arreglo cuadrado rotado

**Figura 14. Tipos de arreglo de tubos**



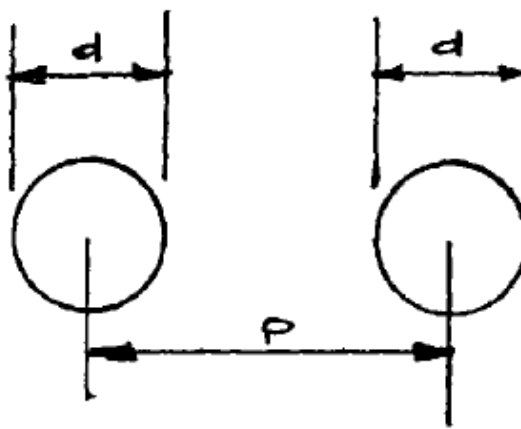
Fuente: Diapositivas MSc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas.

Los arreglos triangulares tienen un ángulo de  $30^\circ$  y  $60^\circ$  respectivamente. Son arreglos compactos y generan un coeficiente de transferencia mayor que en los arreglos cuadrados ya que se pueden acomodar aproximadamente un 15% más de tubos con respecto a los otros. Poseen una desventaja en cuanto a la limpieza mecánica debido a que el espacio entre ellos es limitado y solo es posible la limpieza química o por medio de un chorro de agua.

Los arreglos cuadrados, tienen ángulos de  $45^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente y suelen ser usados cuando es requerida una limpieza mecánica del lado de la coraza. Estos arreglos ofrecen una menor transferencia de calor a cambio de una menor caída de presión del lado de la coraza. El diseño de  $45^\circ$ , se recomienda cuando se tiene un flujo laminar monofásico o servicios de ensuciamiento.

**2.4.2 Paso (Pitch):** Como se observa en la figura 15, el paso o también conocido como pitch, es la distancia entre los tubos medida de centro a centro del tubo. La relación de pitch es generalmente 1.25 veces el diámetro externo del tubo.

**Figura 15. Pitch**



Fuente: Tube pitch and ligament width (Copyright, Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1988.)

### **3. DISEÑO PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA**

#### **3.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS**

Antes de comenzar el cálculo del intercambiador de calor se requiere primero introducir las propiedades del sistema que se desea estudiar, entre las que se encuentran las temperaturas de entrada, los flujos másicos y la temperatura de salida de uno de los dos fluidos.

A continuación, se describe la terminología que se usara para las temperaturas y los flujos:

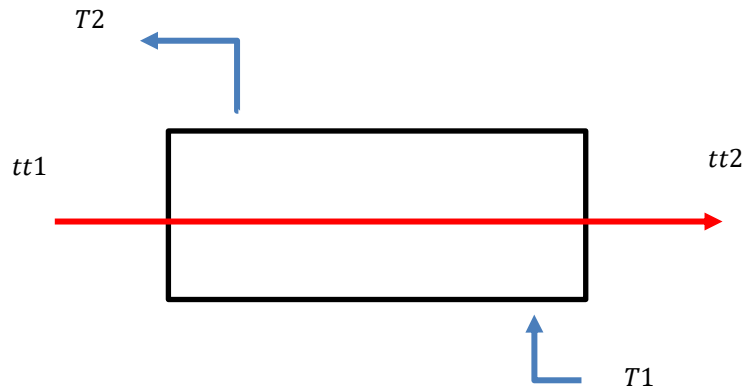
$m_i$ =flujo masico de los fluidos.

$t_{ti}$ = temperaturas en el fluido por tubos.

$T_i$ = temperaturas en el fluido de la coraza.

#### **3.2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL SISTEMA**

El análisis termodinámico se realiza haciendo un balance energético, basado en la primera ley de la termodinámica. El balance del sistema se muestra en la figura 1, y tiene como fin calcular el calor requerido y la temperatura de salida que se desconoce.



$$Q_c = m_c * C_{pc} * (T1 - T2);$$

$$Q_t = m_t * C_{pt} * (tt2 - tt1);$$

$$Q = Q_c = Q_t;$$

### 3.3 CÁLCULO DE LA LMTD

A partir de datos calculados en el análisis termodinámico, podemos determinar la diferencia media logarítmica entre el fluido caliente y el frío.

$$LMTD = ((T1 - tt2) - (T2 - tt1)) / (\log((T1 - tt2) / (T2 - tt1)));$$

$LMTD$  = Temperatura media logarítmica, (Adimensional)

### 3.4 CÁLCULO DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA LMTD (F):

Para calcular el factor de corrección se utilizan las siguientes correlaciones, teniendo en cuenta que el valor mínimo que puede tener  $F$  es de 0,85.

$$R = (T1 - T2) / (tt2 - tt1);$$

$$P = (tt2 - tt1) / (T1 - tt1);$$

$$Px = (1 - ((R * P - 1) / (P - 1))^{(1/i)}) / (R - ((R * P - 1) / (P - 1))^{(1/i)});$$

$$a = ((R^2 + 1)^{(0.5)}) / (R - 1);$$

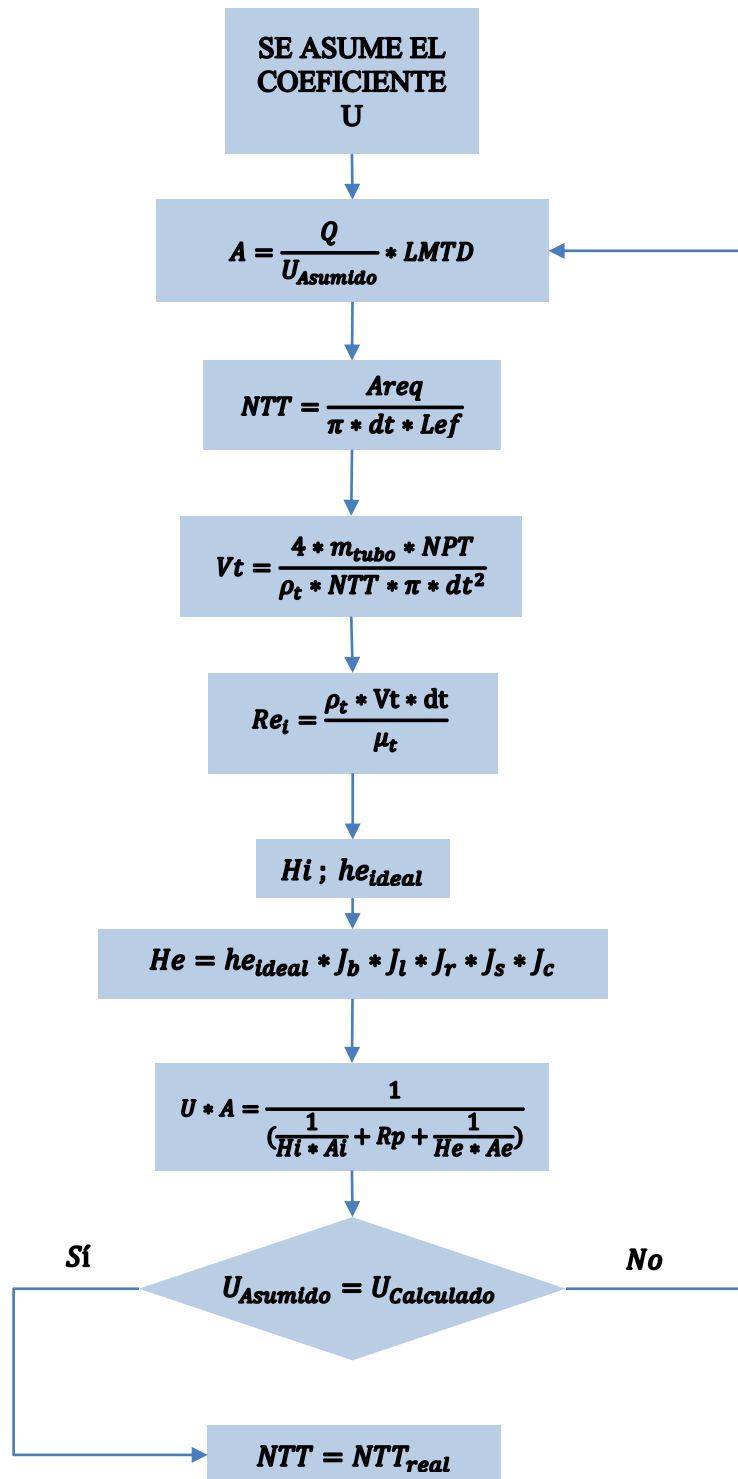
$$b = \log((1 - Px)/(1 - R * Px));$$

$$d = \log((2/Px - 1 - R + (R^2 + 1)^{(1/2)})/(2/Px - 1 - R - (R^2 + 1)^{(1/2)}));$$

$$F = a * b/d;$$

### 3.5 ESQUEMA DE ITERACIÓN A PARTIR DE LA SUPOSICIÓN DEL U

Para lograr un resultado preciso del área requerida y en general los parámetros del intercambiador de calor que se necesita para el calor requerido, es necesario iterar a partir de un U supuesto con las ecuaciones del análisis por transferencia de calor, tomado del Handbook "HEAT TRANSFER DESIGN de Schlunder". Este proceso se puede ilustrar en el siguiente esquema:



### 3.6 CÁLCULO DEL ÁREA A PARTIR DE UN U SUPUESTO

El siguiente paso es asumir un coeficiente global U dependiendo de los fluidos que se estén trabajando, con el fin de realizar el cálculo del área requerida.

$$A_{req} = Q / (U * F * LMTD);$$

$$A_s = (A_{req}) / (N_s);$$

$$A_{tt} = \pi * D_t * L_{ef} * 0.0254$$

### 3.7 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO TOTAL DE TUBOS NTT

El número total de tubos resulta de dividir el área total requerida entre el área de cada tubo. De esta operación se toma el valor más cercano por encima que sea entero.

$$NTT = A_s / A_{tt};$$

### 3.8 CÁLCULO DE VELOCIDAD DE FLUIDO EN LOS TUBOS

Para calcular la velocidad se utiliza la siguiente ecuación que parte de la ley de conservación de la masa, en la que se incluyen los términos de NPT y NTT.

$$\dot{V} = \frac{m_t}{\rho_t} = V_t * A_{t_{transversal}}$$

$$V_t = (4 * m_{tubo} * NPT) / (\rho * ((NTT) * \pi * ((D_t * 0.0254)^2)));$$

### 3.9 PASO ENTRE TUBOS (Ltp)

Para obtener el paso por tubos, se halla la relación  $L_{tp}$  sobre  $D_t$ , para la disposición de los pasos por tubo del Handbook – Schlunder.

$$L_{tp} = rel * D_t$$

**Tabla 3. Recommended tube layout pitch dimensions by U.S. practice (inch based); pitch ratio  $L_{tp}/D_t$ . Handbook.**

Tube OD		Pitch ( $L_{tp}$ )		Pitch ratio
in	mm	in	mm	
0.250	6.350	0.312	7.938	1.250
		0.375	9.525	1.500
0.375	0.525	0.500	12.700	1.330
		0.531	13.494	1.420
0.500	12.700	0.625	15.875	1.250
		0.656	16.669	1.310
		0.688	17.462	1.380
0.625	15.875	0.781	19.844	1.250
		0.812	20.638	1.300
		0.875	22.225	1.400
0.750	19.050	0.938	12.812	1.250
		1.000	25.400	1.330
		1.062	26.988	1.420
		1.125	28.575	1.500
1.000	25.400	1.250	31.750	1.250
		1.312	33.338	1.312
		1.375	34.925	1.375
1.250	31.750	1.562	39.688	1.250
1.500	38.100	1.875	47.625	1.250
2.000	50.800	2.500	63.500	1.250

### 3.10 CÁLCULO DEL DOTL

Para el DOTL se tomaron las correlaciones del Handbook mostradas a continuación dependiendo del número de pasos por tubo que se hayan introducido en un comienzo:

Si el NPT es 1

- Para un arreglo de 45° o 90°:

$$DOTL = 1.11 * \sqrt{NTT} * L_{TP} + Dex_{tu}$$

- Para un arreglo de 30° o 60°

$$DOTL = 1.035 * \sqrt{NTT} * L_{TP} + Dex_{tu}$$

Si el NPT es igual o mayor a 2

$$DOTL = B * \sqrt{C + B^2} + Dex_{tu}$$

$$B = \frac{C_2 * (Dex_{tu} + C_3)}{1.57 * C_1}$$

$$C = \frac{C_4 * (Dex_{tu} + L_{TP}^2)}{0.758 * C_1}$$

- Para un arreglo de 45° o 90°:

C1= 0.995; C2= 0.222; C3= 0.625; C4= 0.866

- Para un arreglo de 30° o 60°:

C1=0.9968; C2= 0.16; C3= 0.625; C4= 1

Donde el LTP se determina mediante la siguiente ecuación:

- Para un arreglo de 30°

$$L_{TP} = 1.33 * Dex_{tu}$$

- Para un arreglo diferente de 30°

$$L_{TP} = 1.25 * Dex_{tu}$$

### 3.11 CÁLCULO DEL Lbbt

El Lbbt, es la tolerancia existente entre el casco y el haz de tubos (claro diametral), el cual se obtiene de las gráficas del Handbook y pueden expresarse en forma de ecuación de la siguiente manera:

$$Lbb = 0.005 * D_s + 12.5$$

$$DOTL = DS - Lbb;$$

### 3.12 DISTANCIA MÍNIMA ENTRE EL BAFLE



El SM es el área transversal por donde le fluido del casco circula la cual corresponde al área delimitada por el casco y los dos bafles que se estén analizando; el área SBP se trata del área que existe entre el haz de tubos y el baffle por la que se crea un by pass. Se calcula para posteriormente hallar los factores de corrección y número de Reynolds del lado del casco.

$$Sm = Lbb * (Lbb + \frac{Dctl}{Ltp\ eff} * (Ltp - Dt))$$

### 3.15 CÁLCULO DE REYNOLDS EN LA CORAZA

Según lo descrito en el Handbook, se calcula Reynolds del lado del casco a partir de los parámetros ya conocidos.

$$Res = (Dt * ms)/(Sm * Dc)$$

### 3.16 CÁLCULO DEL ESPACIO ENTRE EL BAFLE Y LA CORAZA EN LA VENTANA

$$Lbch = (BC * DS)/100$$

$$Yb = (DS/2) - L$$

### 3.17 CÁLCULO DE LOS FACTORES J

#### FACTOR Jr

$$Jr = \frac{1.51}{Nc^{0.18}}$$

### 3.18 NÚMERO DE FILAS EFECTIVAS EN LA VENTANA

$$Vnsmax = \text{sqrt}(4500/Bc)$$

$$Dnsmin = (1e3) * \text{sqrt}(m\_casco/((pi/4) * Vnsmax * Bc))$$

$$Lbi = LB1MF + Dnsmin + 25.4$$

$$Lbo = LB2MF + Dnsmin + 25.4$$

### 3.19 ESPACIAMIENTO DE BAFLE

$$Lix = Lbi/Lbc$$

$$Lox = Lbo/Lbc$$

### 3.20 FACTOR DE FUGAS JI

$$Ji = 0.44 (1 - r_s) + (1 - 0.44 * (1 - r_s)) * \exp(-2.2 * r_{tm})$$

$$r_s = \frac{S_{sb}}{S_{sb} + S_{rb}}$$

$$r_s = \frac{S_{sb} + S_{rb}}{S_m}$$

### 3.21 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN IDEAL HI

En la Schlünder se da primero el coeficiente de convección ideal  $Hi$ , a partir del cual se calculará el real al multiplicar el ideal por los diferentes factores de corrección listados a continuación:

$$hi = ji * Cc * \left( \frac{m_{casco}}{Sm * 1e - 6} \right) * \left( Fc^{-\frac{2}{3}} \right) * (1.2^{0.14});$$

#### Factores de corrección:

JL (factor de corrección por fugas)

Jc (factor de corrección por ventana)

Jb (factor de corrección por bypass)

Jr (factor de corrección por flujo laminar)

Js (factor de corrección por baffles de entrada y salida)

### 3.22 CÁLCULO FACTORES DE CORRECCIÓN

Calculo para determinar JL

$$JL = 0.44 * (1 - rs) + (1 - 0.44 * (1 - rs)) * \exp(-2.2 * rlm)$$

Calculo para determinar JC

$$Jc = 1 - Fw + 0.524 * (Fw^{0.32}) * (Sm/Sw)^{0.02}$$

Calculo para determinar Jb

$$Jb = \exp(-Cbh * Fsbp * (1 - ((2 * rss)^{(1/3)})))$$

Calculo para determinar Js

Si Reynolds es menor a 2000

$$n = 1/3$$

Si Reynolds es diferente de 2000

$$n = 0.6$$

$$Js = ((Nb - 1) + (Lix^{(1 - n)}) + (Lox^{(1 - n)})) / ((Nb - 1) + Lix + Lox);$$

### 3.23 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN (Hext)

A partir del coeficiente de convección ideal, podemos calcular el coeficiente de transferencia de calor real en el lado de la coraza, al multiplicar por los factores de corrección, como se muestra a continuación:

$$Hext = hi * Jb * Jc * JL * Js * Jr;$$

### 3.24 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CALOR INTERNO (Hint)

Para este cálculo, se toman las correlaciones de Nusselt para flujo interno forzado dentro de un tubo, dependiendo del valor del Reynolds que se calcule.

$$Re_t = (4 * (m_{tubo} / (NTT_{dib} / NPT))) / (\pi * (Di / 1000) * u)$$

### 3.25 RESISTENCIA DE LA PARED

Posteriormente se halla la resistencia de la pared del tubo que se requiere más tarde para encontrar el U calculado

$$R_p = \log(D_t/D_i)/(2 * \pi * K * L_e f);$$

$$A_{ext} = \pi * (D_t) * L_e f$$

$$A_{int} = \pi * (D_i) * L_e f$$

### 3.26 CÁLCULO DEL COEFICIENTE GLOBAL (U<sub>cal</sub>)

El coeficiente global de transferencia de calor es calculado por medio de su definición, es decir la suma inversa de las resistencias térmicas existentes entre los dos fluidos:

$$U_{cal} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{ext} * A_{ext}}\right) + R_p + \left(\frac{1}{h_i * A_{int}}\right)};$$

### 3.27 COMPARACIÓN E ITERACIÓN

Finalmente se compara el resultado del coeficiente global calculado con el coeficiente asumido y si estos no son iguales se procede a realizar nuevamente todo el proceso, pero con el nuevo valor calculado ahora como el nuevo U asumido:

$$U = U_{cal}$$

### 3.28 CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE PRESIÓN EN TUBOS Y CORAZA

**3.28.1 En los tubos.** La relación para la pérdida de presión y pérdida de carga, es una de las relaciones más generales en la mecánica de fluidos y válida para flujos laminar o turbulento, tuberías circulares o no-circulares y tuberías con superficies lisas o rugosas. (CENGEL, Yunus A., Op. Cit. P. 329.)

La pérdida de carga, se define por la siguiente expresión:

$$h_l = f * \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

Donde:

$h_l$  = Pérdida de carga, (ft)

$f$  = Factor de fricción, (Adimensional)

$L$  = Longitud de la tubería, (ft)

$D$  = Diámetro de la tubería (ft)

$v$  = Velocidad, (ft/s<sup>2</sup>)

$g$  = factor de gravedad, (ft/s<sup>2</sup>)

La pérdida de presión en la línea se define por:

$$\Delta P = \rho * g * h$$

Dónde:

$\Delta P$  = Caída de presión, (psi)

$\rho$  = Densidad, (lbm/ft<sup>3</sup>)

$g$  = Gravedad,  $\left(\frac{lb * s^2}{lbm * ft}\right)$

$h$  = Pérdida de carga, (ft)

**3.28.2 En la coraza.** Para flujo de gas o líquido a través de un banco de tubos en el lado de la coraza la caída de presión se obtiene por una modificación del factor de fricción de Fanning.

$$\Delta P = K_S \frac{2N_R f' G_S^2}{g_c \rho \emptyset}$$

Donde:

$K_S$  = Factor de corrección por deflectores, (Adimensional)

$N_R$  = Número de filas de tubos, (Adimensional)

$f'$  = Factor de fricción de Fanning

$G_S$  = Velocidad másica por unidad de flujo al plano central, (lbm/s)

$g_c$  = factor de gravedad,  $\left(\frac{\text{lb} \cdot \text{ft} / \text{s}^2}{\text{lbm} \cdot \text{ft}}\right)$

$\rho$  = Densidad, (lbm/ft<sup>3</sup>)

$\emptyset$  = Factor de corrección no isotérmico, (Adimensional)

Y factor de fricción de Fanning está dado por:

$$f' = b \left( \frac{D_o G_S}{\mu_b} \right)$$

El factor b, está regido bajo el arreglo de la tubería que se implemente, de tal manera, si el arreglo es triangular o cuadrado rotado b se define como:

$$b = 0.23 + \frac{0.11}{(X_T - 1)^{1.08}}$$

Si el arreglo es cuadrado, b es igual a:

$$b = 0.044 + \frac{0.08 X_T}{(X_T - 1)^{0.43 + 1.13/X_T}}$$

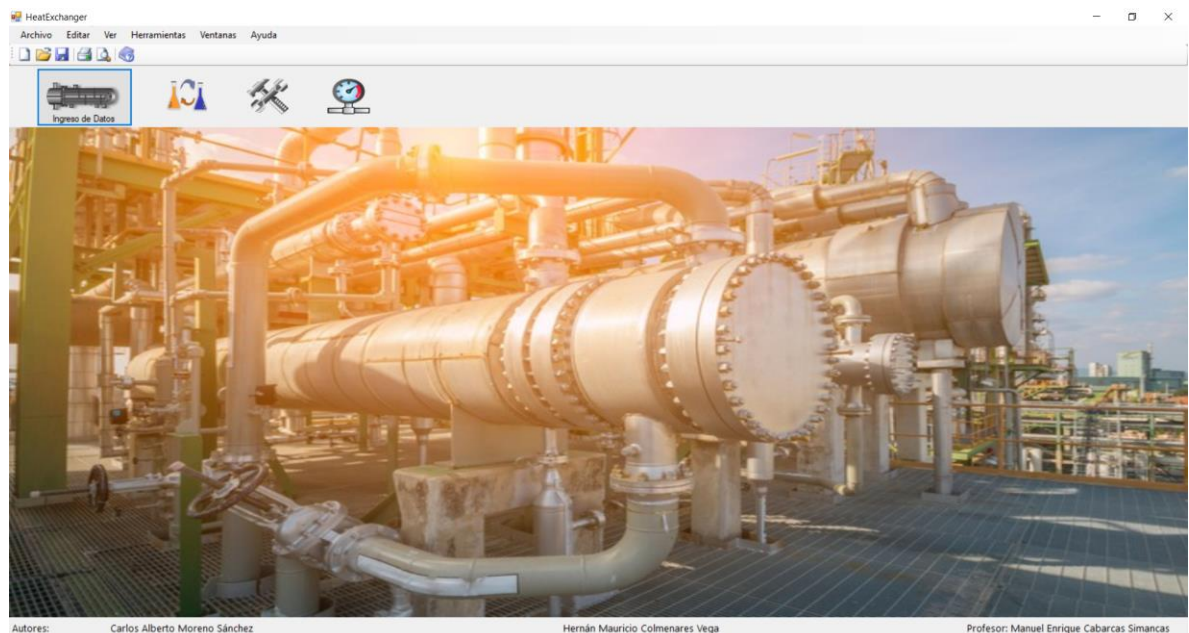
Donde:

$$X_T = \frac{\text{Pitch transversal al flujo}}{D_{ex}}$$

#### 4. INTERFAZ SOFTWARE ST219

ST219, es un software que permitirá el cálculo en el diseño de un intercambiador de calor de Tubos y Coraza enfocado a plantas de gas natural. Gracias al software los estudiantes contarán con una herramienta académica que no sólo les permitirá conocer el resultado final del diseño sino también las variables intermedias requeridas para llegar a este resultado que otros tipos de software no muestran. El lenguaje que se utilizó para el desarrollo del software ST219, fue Visual Basic.NET, uno de los muchos lenguajes de programación que posee Visual Studio.NET, el cual nos permitió crear una interfaz amigable con el usuario y que le permite trabajar de manera sencilla en cada uno de los módulos al usuario. ST219 se compone de 4 módulos de diseño los cuales son: módulo de propiedades, módulo de balance de energía, módulo de diseño mecánico y finalmente módulo de pérdidas de presión.

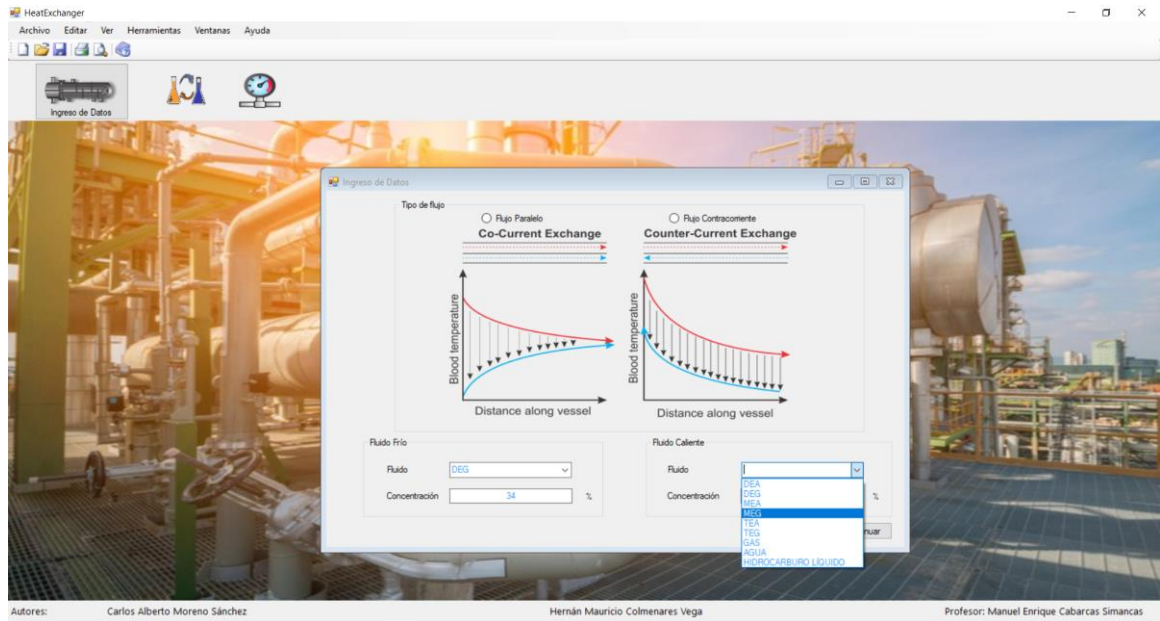
**Figura 17. Pantalla principal del software**



Fuente: Autores.

En la pantalla principal, el usuario puede encontrar las diferentes opciones del diseño de un intercambiador de calor de tubos y coraza, como lo es el balance de energía, la caída de presión, el diseño mecánico.

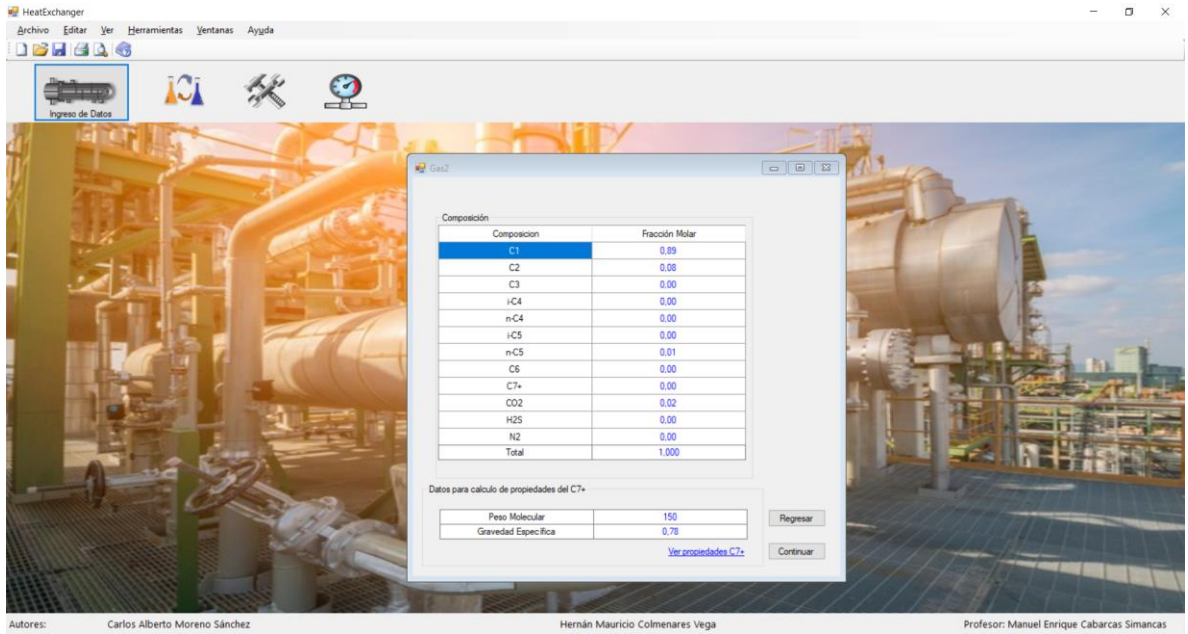
**Figura 18. Formulario de selección de fluidos y concentración.**



Fuente: Autores.

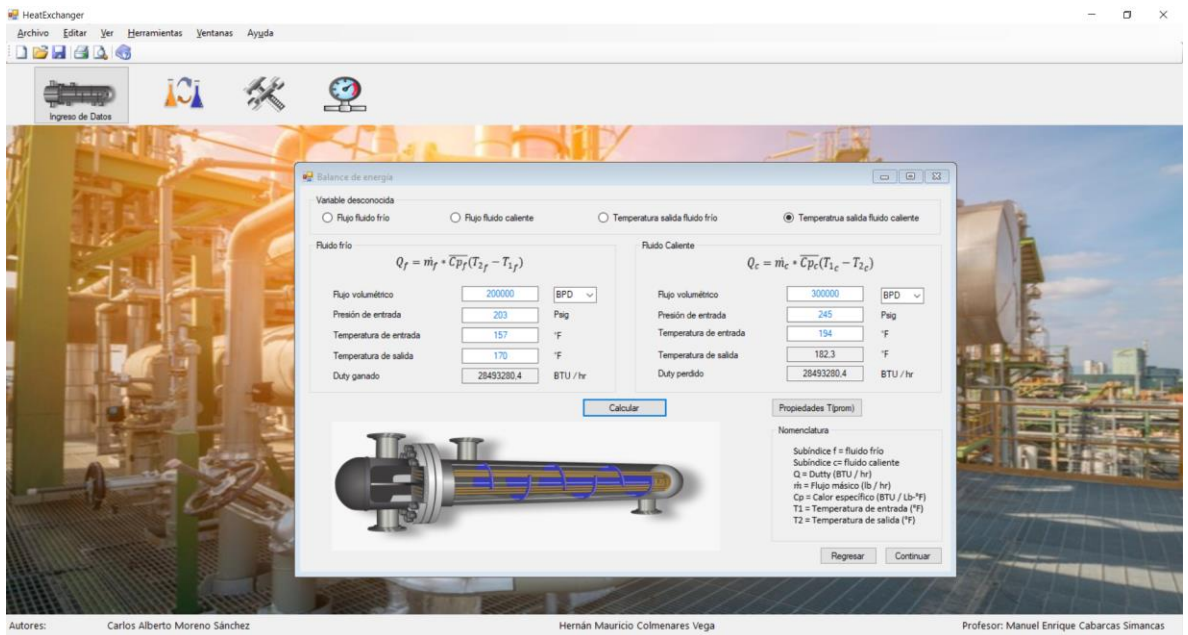
En esta ventana, se puede seleccionar el tipo de flujo que se da en un intercambiador de tubos y coraza, el cual viene predeterminado con el flujo a contracorriente, puesto que este es el más utilizado. También se realiza la selección de los fluidos que se van a utilizar en, el proceso y su respectiva concentración.

**Figura 19. Ventana de composición del gas.**



Fuente: Autores.

Figura 20. Ventana de balance de energía.



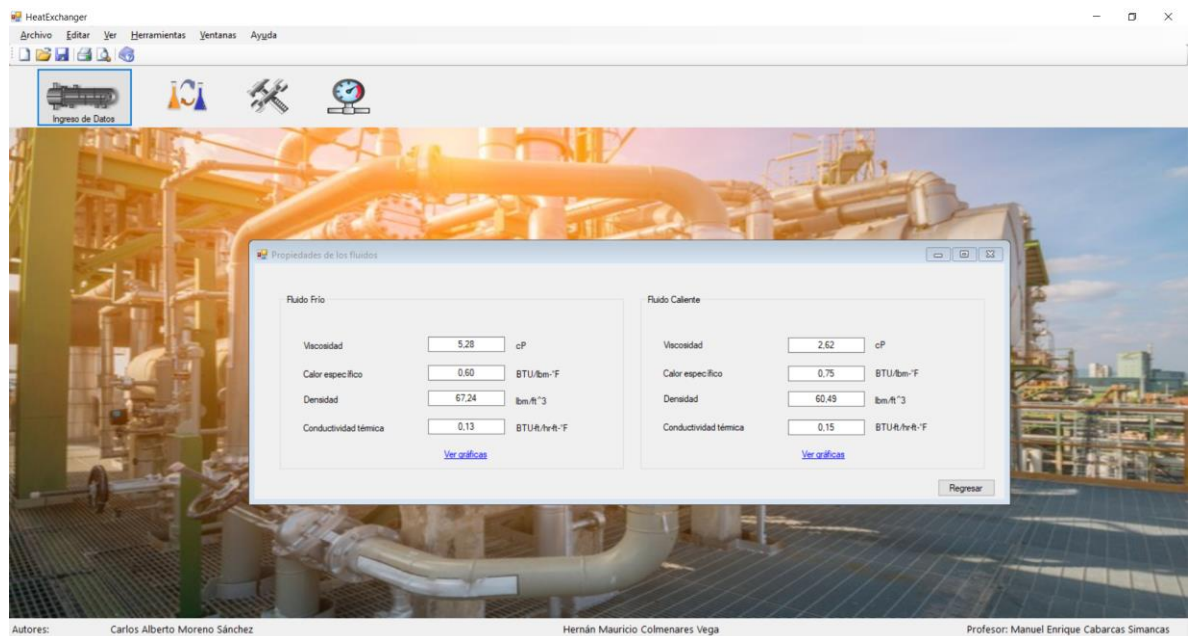
Fuente: Autores.

En la tercera ventana, se genera el ingreso de las condiciones a las cuales operaran los fluidos seleccionados y se realizará el cálculo del Duty que tendrá el proceso. Así mismo, las propiedades de los fluidos, que se tendrán en cuenta a lo largo de todo el diseño.

PD. Se presentará un mensaje de alerta, dado el caso de que se sobrepasen las condiciones a las cuales se opera generalmente en una planta de gas natural.

Las propiedades calculadas son: viscosidad, densidad, conductividad térmica, calor específico, flujo volumétrico del fluido frio o caliente según corresponda.

**Figura 21. Propiedades de los fluidos seleccionados**



Fuente: Autores.

En esta ventana se encontrarán las propiedades calculadas según los datos que se ingresaron en la ventana anterior y su respectiva gráfica.

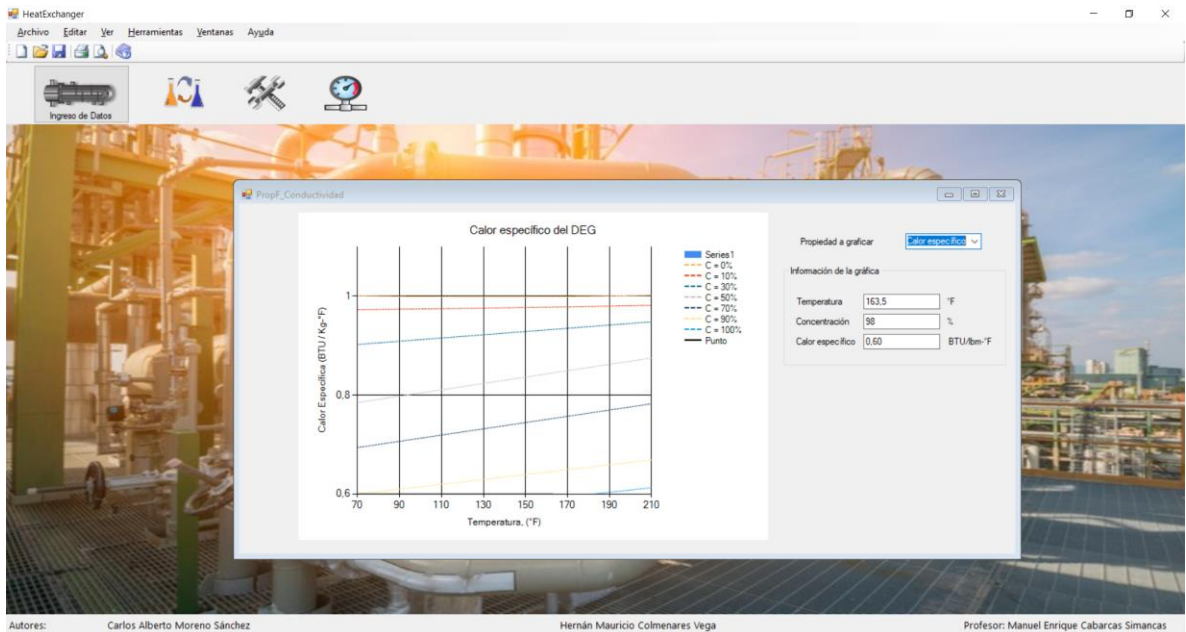
**Figura 22. Gráficas de propiedades del DEG**



Fuente: Autores.



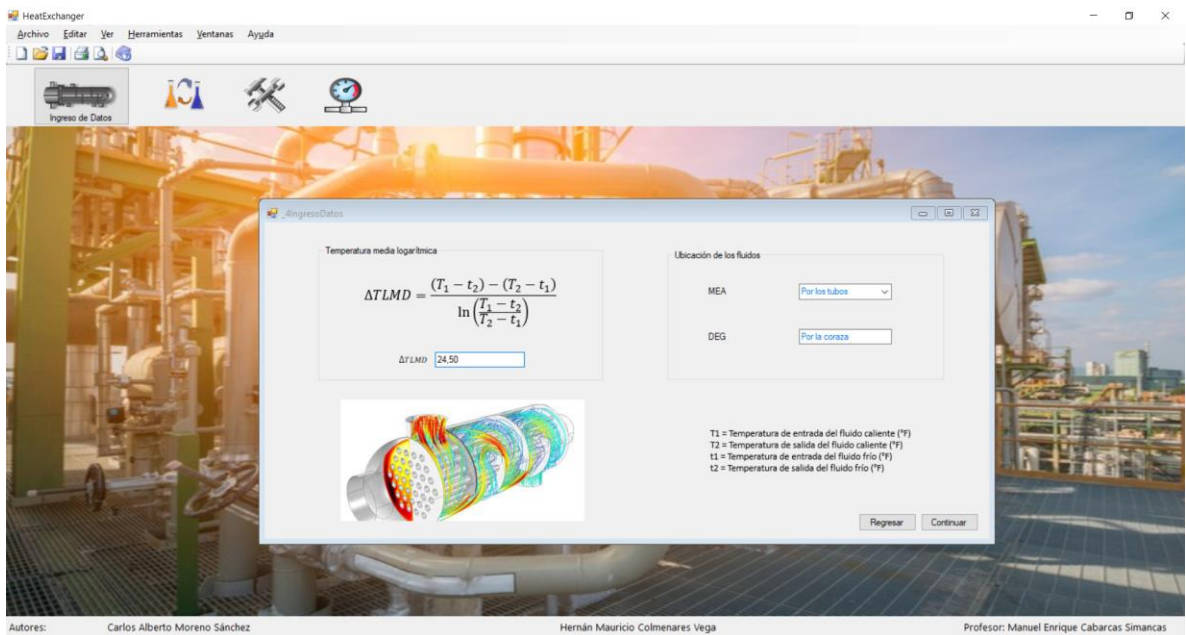
Fuente: Autores.



Fuente: Autores.

En estas imágenes se pueden observar algunos de los ejemplos de la forma en cómo se visualizan las gráficas de las propiedades calculadas por el software ST219 para el diseño del intercambiador de calor.

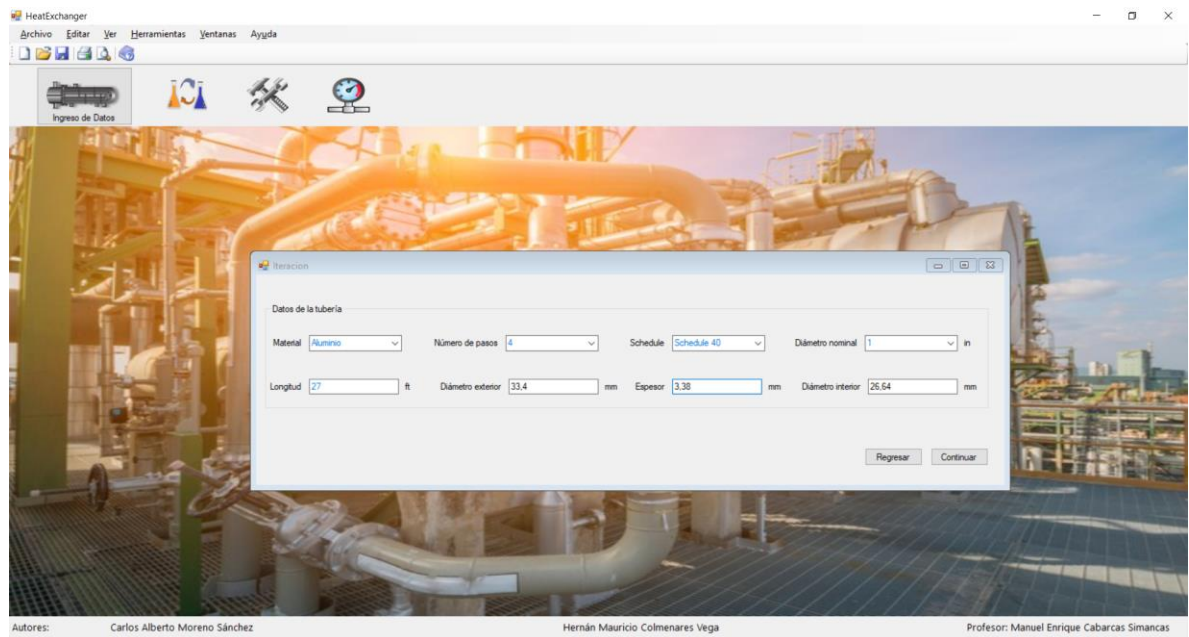
### Figura 23. Temperatura media logarítmica y ubicación de los fluidos



Fuente: Autores.

Aquí se puede observar el valor de la temperatura media logarítmica del proceso y a su vez, se podrá seleccionar la ubicación de cada fluido ya sea por el lado de los tubos o por el lado de la coraza.

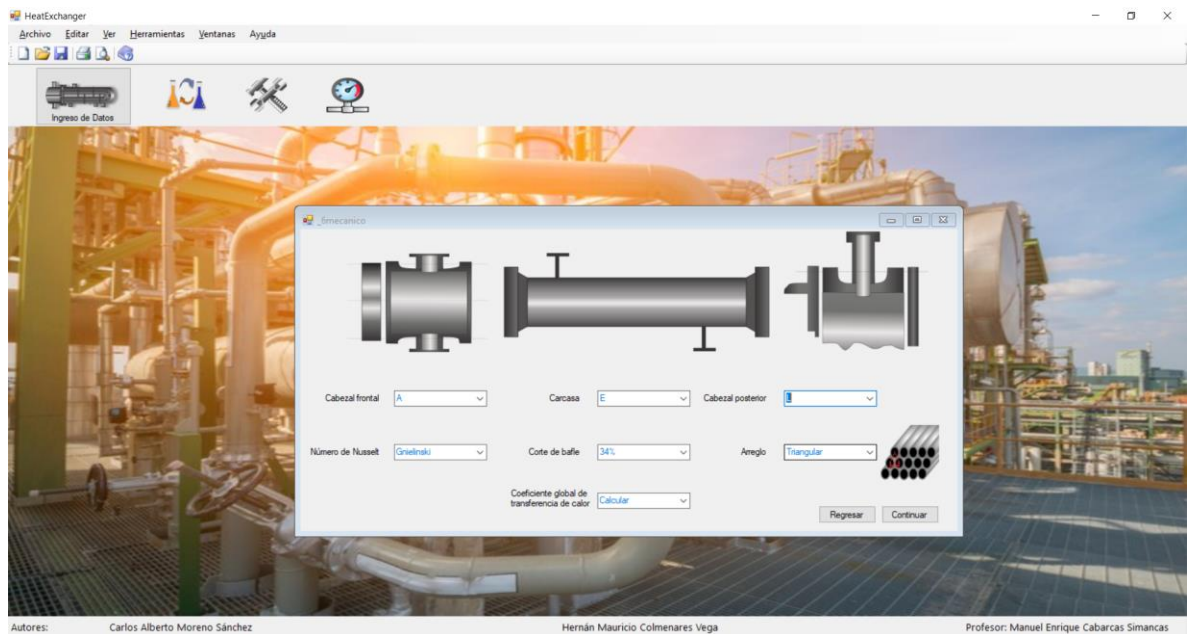
**Figura 24. Datos de la tubería**



Fuente: Autores.

En esta sección, se podrán elegir las características de la tubería que se utilizara para los cálculos del diseño mecánico del intercambiador de calor.

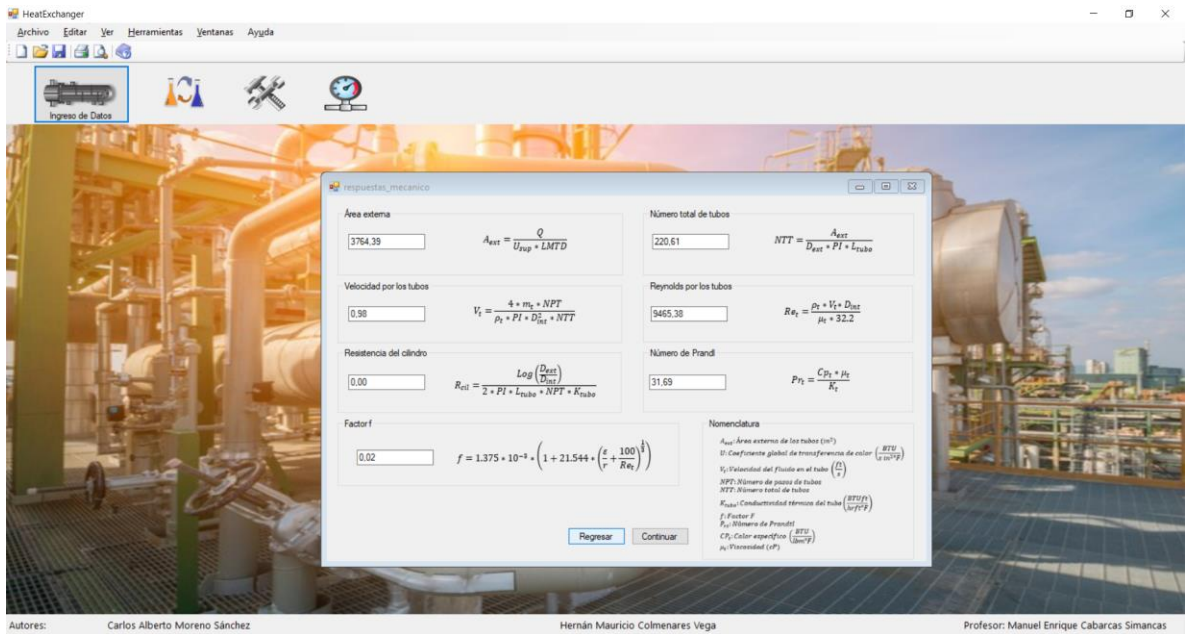
**Figura 25. Selección de cabezales y coraza.**



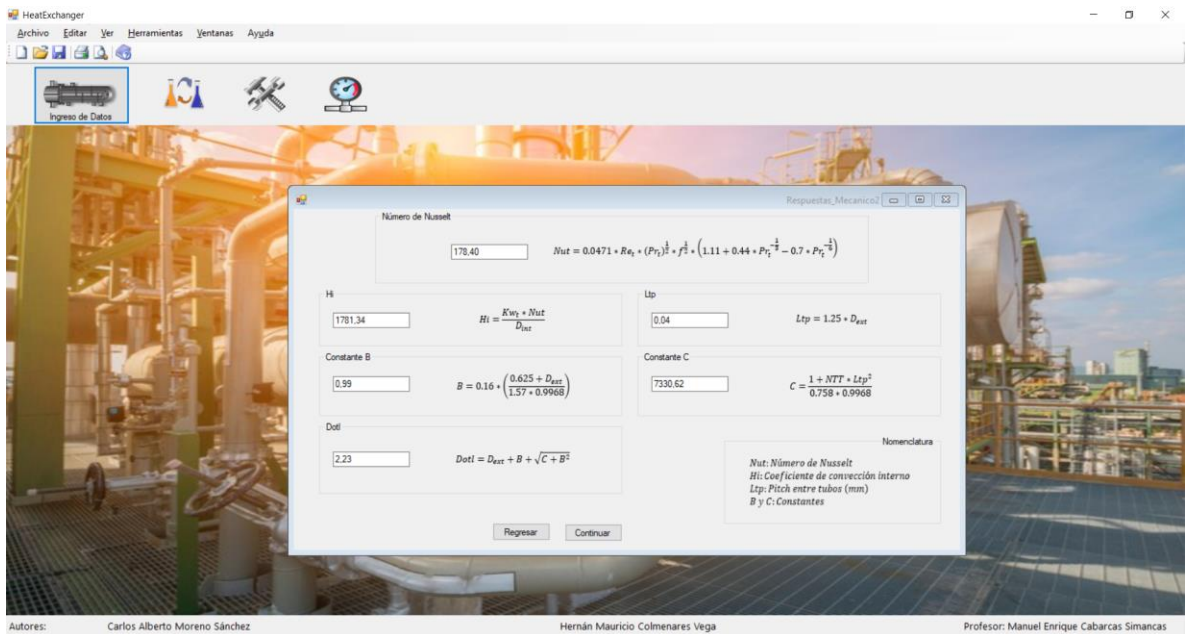
Fuente: Autores.

En esta ventana, se pueden seleccionar los diferentes tipos de corazas y cabezales utilizados en la industria para plantas de gas natural. Así mismo, el arreglo de los tubos y se podrá ingresar el coeficiente global de transferencia de calor o el software realizará el cálculo para determinar dicho coeficiente.

**Figura 26. Resultados**



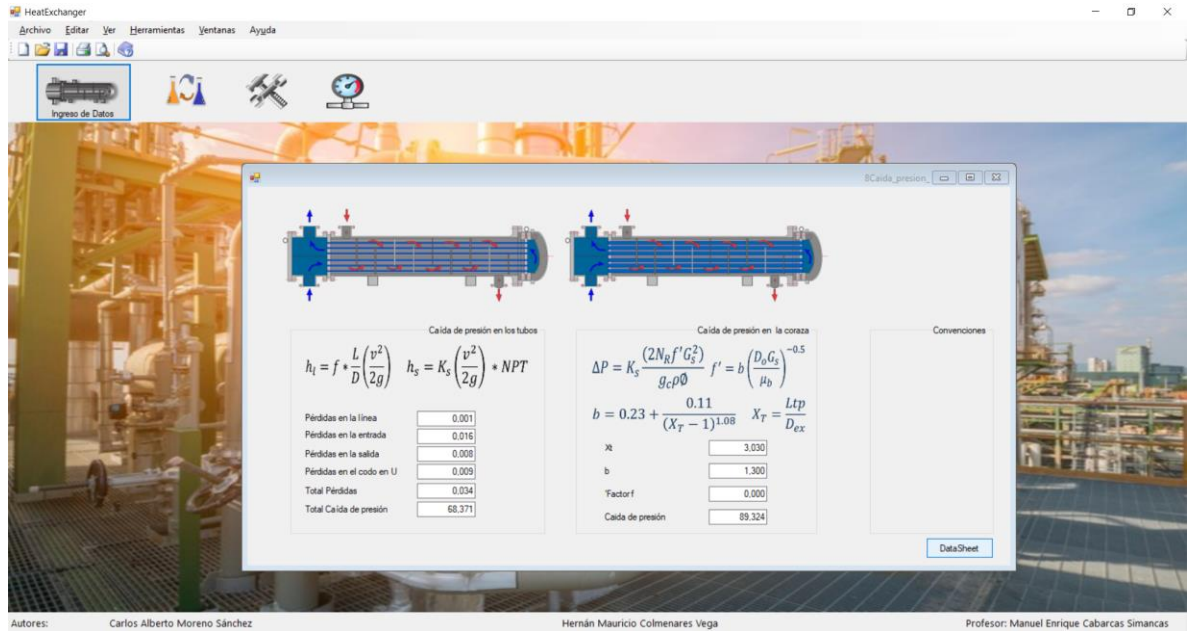
Fuente: Autores.



Fuente: Autores.

En estas dos ventanas, se podrán observar los diferentes resultados del diseño mecánico, como lo son el número total de tubos, la velocidad por los tubos, área externa del intercambiador, número de baffles entre otras.

**Figura 27. Caída de presión en tubos y coraza**



Fuente: Autores.

## 5. OTROS SOFTWARE

En la industria se encuentran actualmente diversos tipos de software que permiten realizar operaciones para diseño de equipos y simulaciones de procesos. Dentro de estos destacan algunos como lo es Aspen Hysys el cual es muy empleado en la industria y a nivel académico. A raíz de la búsqueda de un mejor aprendizaje se han venido desarrollando nuevos tipos de software enfocados en tener una interfaz amigable e interactiva en la que lo estudiantes y personas con intereses afines a cada área en este caso al diseño de intercambiadores tengan la facilidad de acceso a un software que les permita conocer las diferentes variables que son empleadas en el proceso para tener así un mayor conocimiento y entendimiento del mismo. Algunas de las ventajas del software ST219 respecto a otros es su interfaz mas amigable con el usuario, permite intercambiar entre diferentes tipos de coraza y cabezales.

1. Parámetros de Proceso

Ayuda

**1.1 Datos del lado del casco**

Temperatura de Entrada (T1) 350 K

Temperatura de Salida (T2) 310 K

Presión en el Casco (Pc) 300 psi

Flujo Másico (mc) 6 kg/s

Fluido Agua

**1.2 Datos del lado de los tubos**

Temperatura de Entrada (t1) 300 K

Temperatura de Salida (t2) 320 K

Presión en los tubos (Pt) 300 psi

Flujo Másico (mt) 12.0056 kg/s

Fluido Agua

**1.3 Flujo másico conocido**

Lado del Casco  Lado de los Tubos

**1.4 Lado caliente**

Lado del casco  Lado de los Tubos

Actualizar Cerrar

Fuente: FONSECA PICON, Laura Andrea. RIVERO VARGAS, Laura Marcela. Diseño térmico y mecánico de intercambiadores de calor de casco y tubo. Ingeniero(a) Mecánico. Bucaramanga, Santander: Universidad industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicomecánicas. 2009. Pág. 128.

Balance de energía

Variable desconocida

Flujo fluido frío  Flujo fluido caliente  Temperatura salida fluido frío  Temperatura salida fluido caliente

**Fluido frío**

$$Q_f = \dot{m}_f \cdot \overline{C}_{p_f} (T_{2f} - T_{1f})$$

Flujo volumétrico 200000 BPD

Presión de entrada 203 Paig

Temperatura de entrada 157 °F

Temperatura de salida 170 °F

Duty ganado 28493280.4 BTU / hr

**Fluido Caliente**

$$Q_c = \dot{m}_c \cdot \overline{C}_{p_c} (T_{1c} - T_{2c})$$

Flujo volumétrico 300000 BPD

Presión de entrada 245 Paig

Temperatura de entrada 194 °F

Temperatura de salida 182.3 °F

Duty perdido 28493280.4 BTU / hr

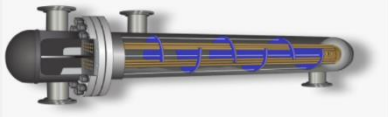
Calcular

Propiedades T(prom)

Nomenclatura

Subíndice f = fluido frío  
 Subíndice c = fluido caliente  
 Q = Duty (BTU / hr)  
 m = Flujo másico (lb / hr)  
 Cp = Calor específico (BTU / (lb·°F))  
 T1 = Temperatura de entrada (°F)  
 T2 = Temperatura de salida (°F)

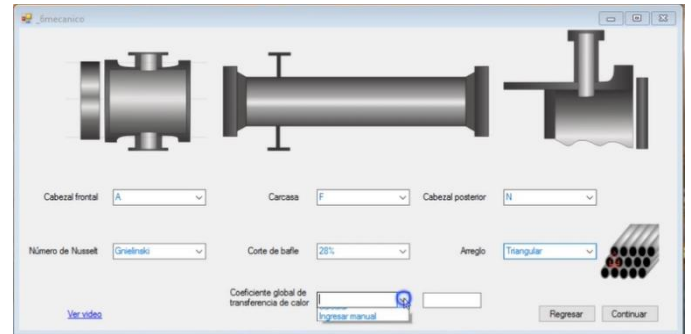
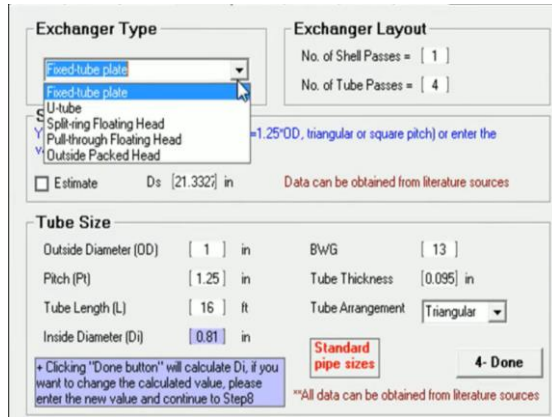
Regresar Continuar



Fuente: Autores

El software ST219 ofrece una interfaz más amigable con el usuario, ya que cuenta con imágenes de apoyo, videos, nomenclatura de las diferentes ecuaciones que

intervienen en el diseño, gráficas de cada una de las propiedades de los fluidos seleccionados, además de tener la posibilidad de intercambiar diferentes tipos de coraza y cabezales.



Fuente: Shell and tube heat exchanger Design (S&THex) (v1.6). recuperado de <http://www.webbustertz.com/>

Fuente: Autores

## 6. VALIDACIONES

La validación del software ST219 se realizó alternando los diferentes fluidos que lo componen, en cada una de las etapas del diseño del intercambiador para así corroborar la veracidad de los resultados obtenidos. La validación fue realizada con un software comercial llamado Aspen Hysys.

Como se puede observar en las tablas a continuación, con las diferentes variables que se analizaron en el proceso de diseño de los intercambiadores de calor de tubos y coraza, obtuvimos un margen de error aceptable con respecto al software Aspen Hysys a lo largo de cada uno de los módulos.

**Tabla 4. Validación de resultados DEG-MEA**

<b>Caso</b>	<b>Ítem</b>	<b>Unidades</b>	<b>ST219</b>	<b>Aspen Hysys</b>	<b>%error</b>
Propiedades	Viscosidad DEG	cp	5.17	4.9545	4.3495812
	Calor específico DEG	BTU/lbm*°F	0.61	0.62	1.6129032
	Densidad DEG	lbm/ft^3	67.2	69.82	3.7525064
	Conductividad térmica DEG	Btu/hr-ft-F	0.13	0.1216	6.9078947
	Viscosidad MEA	cp	2.67	2.6303	1.5093335
	Calor específico MEA	BTU/lbm*°F	0.75	0.694	8.0691643
	Densidad MEA	lbm/ft^3	60.54	61.08	0.8840864
	Conductividad térmica MEA	Btu/hr-ft-F	0.15	0.1484	1.0781671
Balance de energía	Temp. salida fluido caliente	°F	179.6	182.3	1.4810752
	Duty	Btu/hr	28,493,280	26,668,106	6.8440362
	Temperatura media logarítmica		21.5	22.43	4.1462327
Diseño mecánico	Área externa	m^2	4510.43	4642	2.8343386
	Número de tubos		161.98	160	1.2375
Caída de presión	Lado de los tubos	psi	3.6	2.9	24.137931
	Lado de la coraza	psi	6.2	5.3	16.9811321

**Tabla 5. Validación de resultados MEG-TEG**

Caso	Ítem	Unidades	ST219	Aspen Hysys	%error
Propiedades	Viscosidad MEG	cp	2.52	2.53	0.3952569
	Calor específico MEG	BTU/lbm*°F	0.64	0.6212	3.0264005
	Densidad MEG	lbm/ft <sup>3</sup>	66.31	66.29	0.0301705
	Conductividad térmica MEG	Btu/hr-ft-F	0.145	0.151	3.9735099
	Viscosidad TEG	cp	2.59	2.7760	6.7002882
	Calor específico TEG	BTU/lbm*°F	0.65	0.5957	9.1153265
	Densidad TEG	lbm/ft <sup>3</sup>	63.53	65.63	3.1997562
	Conductividad térmica TEG	Btu/hr-ft-F	0.11	0.1132	2.8268551
Balance de energía	Temp. salida fluido caliente	°F	206.9	204.7	1.0747435
	Duty	Btu/hr	59359760	56,526,735	5.0118317
	Temperatura media logarítmica	°F	41.5	43.07	3.6452287
Diseño mecánico	Área externa	m <sup>2</sup>	4092.49	4132	0.9561955
	Número de tubos		188.44	182	3.5384615
Caída de presión	Lado de los tubos	psi	8	10	20
	Lado de la coraza	psi	7.4	9	17.777778

**Tabla 6. Validación de resultados Agua-TEA**

caso	Ítem	unidades	ST219	Aspen Hysys	%error
propiedades	viscosidad Agua	cp	0.81	0.836	3.1100478
	Calor específico Agua	BTU/lbm*°F	1.03	0.9719	5.9779813
	Densidad Agua	lbm/ft <sup>3</sup>	62.68	62.29	0.6261037
	Conductividad térmica Agua	Btu/hr-ft-F	0.36	0.3577	0.6429969

	viscosidad MEA	cp	4.3	4.7340	9.1677229
	Calor especifico MEA	BTU/lbm*°F	0.61	0.5931	2.8494352
	Densidad MEA	lbm/ft^3	61.89	68.7	9.9126638
	Conductividad térmica MEA	Btu/hr-ft-F	0.1251	0.1174	6.5587734
balance de energía	Temp. salida fluido caliente	°F	107.8	111.8	3.5778175
	Duty	Btu/hr	37290876	45468993	17.98614
	temperatura media logarítmica	°F	51.37	41.14	24.86631
Diseño mecánico	Área externa	m^2	1423	1141	24.715162
	Número de tubos		105.85	110	3.7727273
caída de presión	Lado de los tubos	psi	8.561	9.315	8.0944713
	Lado de la coraza	psi	4.83	7.415	34.861767

**Tabla 7. Validación de resultados gas-MEA**

caso	Ítem	unidades	ST219	Aspen Hysys	%error
propiedades	viscosidad Gas	cp	0.0132	0.01266	4.2654028
	Calor especifico Cas	BTU/lbm*°F	0.51	0.42	21.428571
	Densidad Gas	lbm/ft^3	1.435	1.324	8.3836858
	Conductividad térmica Gas	Btu/hr-ft-F	0.0365	0.0266	37.218045
	viscosidad MEA	cp	2.43	2.154	12.81337
	Calor especifico MEA	BTU/lbm*°F	0.427	0.4393	2.7999089
	Densidad MEA	lbm/ft^3	61.2	59.98	2.0340113
	Conductividad térmica MEA	Btu/hr-ft-F	0.1384	0.1406	1.5647226
balance de energía	Temp. salida fluido caliente	°F	187.4	189.1	0.8989952
	Duty	Btu/hr	22354789.31	23101036.82	3.230363

<b>caso</b>	<b>Ítem</b>	<b>unidades</b>	<b>ST219</b>	<b>Aspen Hysys</b>	<b>%error</b>
	temperatura media logarítmica	°F	41.27	39.18	5.3343543
Diseño mecánico	Área externa	m <sup>2</sup>	298.7	247.4	0.1005362
	velocidad por los tubos	m/s	44.56	41.27	7.9718924
	Número de tubos		98	104	5.769230
Caída de presión	Lado de los tubos	psi	9	10	10
	Lado de la coraza	psi	8.4	10	16

## 7. CONCLUSIONES

- Se logró el desarrollo de un software para el diseño de intercambiadores de calor de tubos y coraza, de fácil entendimiento y manejo, con una interfaz amigable con el usuario, el cual podrá ser empleado por los estudiantes de ingeniería de petróleos, para lograr un mejor entendimiento en el proceso de diseño de dichos intercambiadores.
- Realizando el análisis del bajo porcentaje de error general que presenta en el proceso comparado con software comerciales, se puede decir que el software ST219, es una herramienta válida para el cálculo y diseño de intercambiadores de calor de tubos y coraza, para plantas de gas natural.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un software para el diseño de los diferentes tipos de intercambiadores de calor que se pueden emplear, como lo son los intercambiadores de placas.
- Realizar la búsqueda de diferentes ecuaciones de las propiedades de los fluidos empleados que puedan reducir el margen de error en el proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

ANDREWS, S. FASTQC, A quality control tool for high throughput sequence data. 2010

AUGEN, J. Bioinformatics in the post-genomic era: Genome, transcriptome, proteome, and information-based medicine. Addison-Wesley Professional. 2004

BLANKENBERG, D., KUSTER, G. V., CORAOR, N., ANANDA, G., LAZARUS, R., MANGAN, M., ... & TAYLOR, J. Galaxy: a web-based genome analysis tool for experimentalists. Current protocols in molecular biology, 2010 19-10.

BOLGER, A., & GIORGI, F. Trimmomatic: A Flexible Read Trimming Tool for Illumina NGS Data. URL <http://www.usadellab.org/cms/index.php>.

CENGEL. Yunus A. GHAJAR. Afshin J. Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones. 4ta edición. México D.F.

GIARDINE, B., RIEMER, C., HARDISON, R. C., BURHANS, R., ELNITSKI, L., SHAH, P., ... & NEKRUTENKO, A. Galaxy: a platform for interactive large-scale genome analysis. Genome research, 15(10), 2005 1451-1455.

GONZÁLEZ-MENDIZABAL Dosinda Guia de intercambiadores de calor: tipos generales y aplicaciones Sartenejas: Universidad Simón Bolívar Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia marzo de 2002.

KERN, D.Q. Process Heat Transfer Mcgraw-Hill 1958.

Standards of Tubular Exchangers Manufacturers Association, TEMA, 1978.

GELVEZ, Omar. Software para la distribución de tubos en intercambiadores de calor. Bucaramanga, Colombia. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. 2012.

## ANEXOS

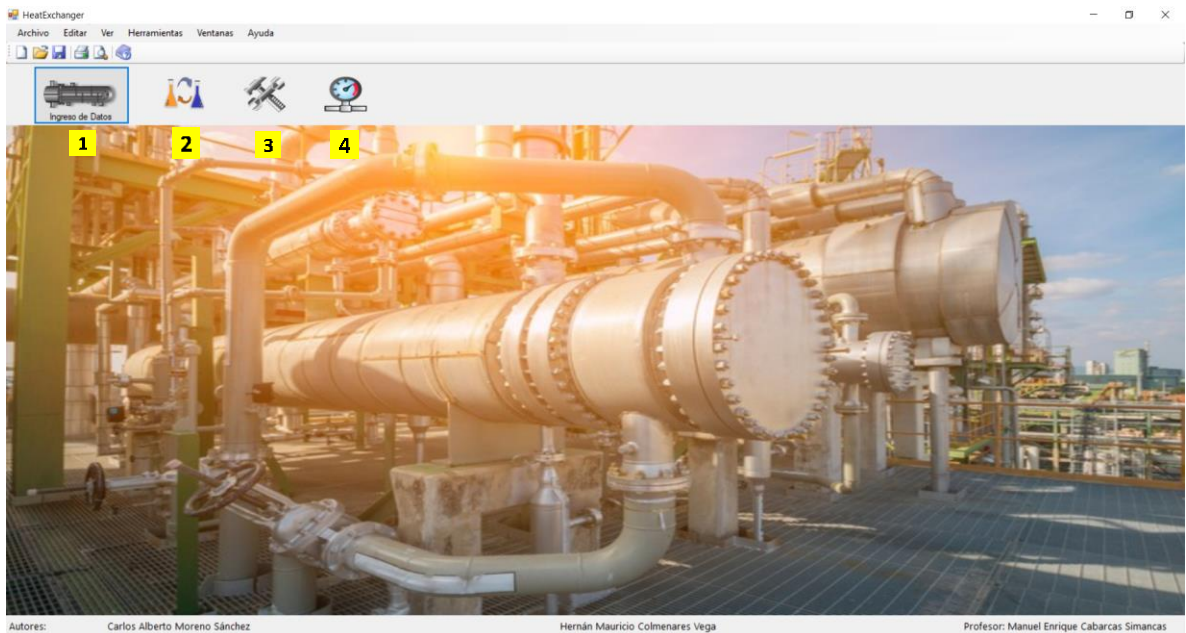
### ANEXO A: TABLA DE DIAMETROS DE TUBERIA SEGÚN TEMA (TABLA RCB-7.21)

**TUBE HOLE DIAMETERS AND TOLERANCES**  
(All Dimensions in Inches)

Nominal Tube OD	Nominal Tube Hole Diameter and Under Tolerance				Over Tolerance; 96% of tube holes must meet value in column (c). Remainder may not exceed value in column (d)	
	Standard Fit (a)		Special Close Fit (b)			
	Nominal Diameter	Under Tolerance	Nominal Diameter	Under Tolerance	(c)	(d)
1/4	0.259	0.004	0.257	0.002	0.002	0.007
3/8	0.384	0.004	0.382	0.002	0.002	0.007
1/2	0.510	0.004	0.508	0.002	0.002	0.008
5/8	0.635	0.004	0.633	0.002	0.002	0.010
3/4	0.760	0.004	0.758	0.002	0.002	0.010
7/8	0.885	0.004	0.883	0.002	0.002	0.010
1	1.012	0.004	1.010	0.002	0.002	0.010
1 1/4	1.264	0.006	1.261	0.003	0.003	0.010
1 1/2	1.518	0.007	1.514	0.003	0.003	0.010
2	2.022	0.007	2.018	0.003	0.003	0.010
2 1/2	2.528	0.010	2.523	0.004	0.004	0.010
3	3.033	0.012	3.027	0.004	0.004	0.010

## ANEXO B: MANUAL DE USUARIO

1. Ejecute el archivo “ST219.application”, posteriormente aparecerá la pantalla principal del software que se muestra a continuación:

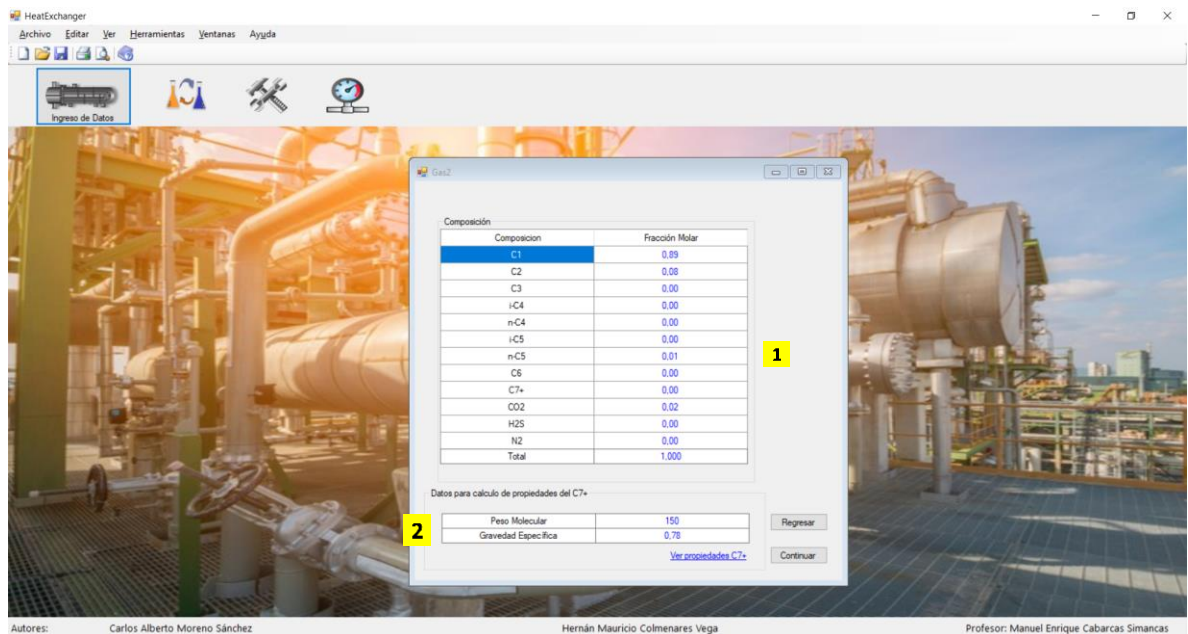


Fuente: Autores.

El software se compone de 4 módulos: 1. Propiedades de los fluidos e ingreso de datos, 2. balance de energía, 3. diseño mecánico y 4. caída de presión, el usuario deberá ingresar los datos a lo largo del proceso.

### Módulo de propiedades e ingreso de datos

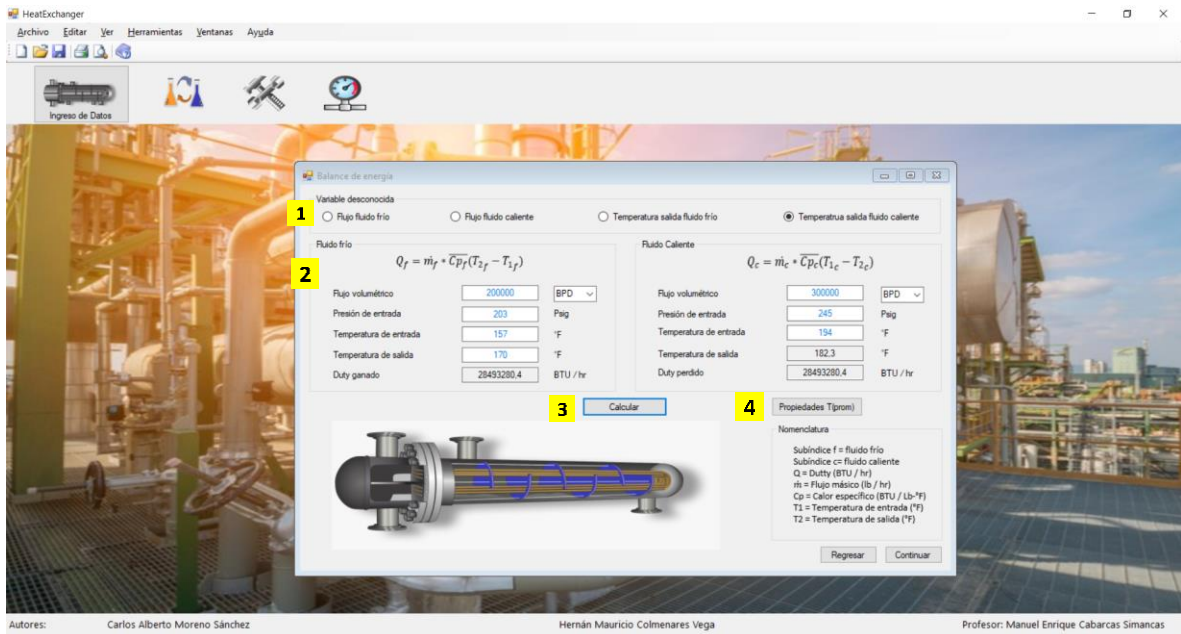




Fuente: Autores.

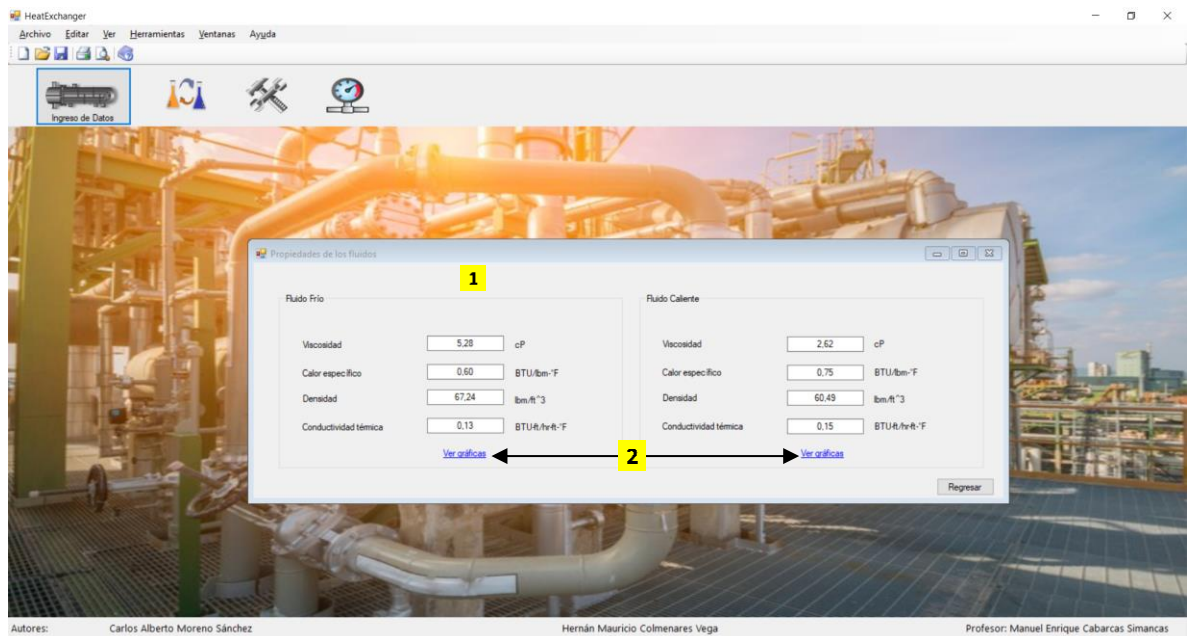
1. Para esta sección el usuario podrá ingresar la composición del gas en fracción molar (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7+, CO2, N2, H2S) que se quiera emplear, de igual forma el total de la suma de los componentes se observa al final de esta tabla de composición y siempre deberá dar como resultado 1, de lo contrario saldrá un aviso que recordara cuanto debe dar el total.
2. Aquí se podrá observar dos de las propiedades de interés del gas como son el peso molecular y gravedad específica.

## Módulo de balance de energía



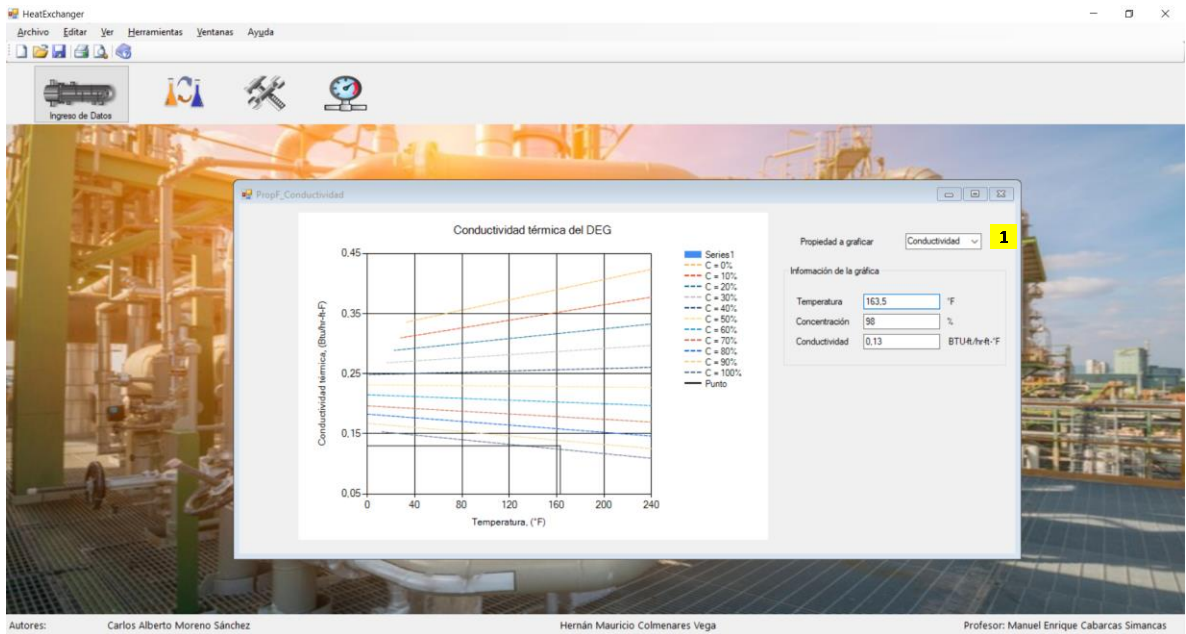
Fuente: Autores.

1. En esta sección el usuario tendrá que seleccionar la variable que desee calcular ya sea el flujo de alguno de los lados (tubos o coraza) o alguna temperatura de salida del intercambiador ya que estos son las variables que generalmente se desconocen.
2. Una vez es seleccionada la variable a calcular, el software deshabilitará la variable para que así el usuario pueda hacer el ingreso de datos como: temperaturas, presiones, flujos volumétricos y poder determinar el Duty junto con la variable que se seleccionó.
3. Una vez se tengan ingresados los datos que se encuentran habilitados se dará clic en el botón “Calcular” para determinar la variable seleccionada junto con el Duty y las propiedades promedio de los fluidos en el intercambiador.
4. Dando clic en el botón “Propiedades T(prom)” se abrirá una nueva ventana en la cual se observarán los valores promedio de las propiedades calculadas (Viscosidad, Densidad, Conductividad Térmica y Calor Especifico) para los dos fluidos involucrados en el proceso como se muestra a continuación:



Fuente: Autores.

1. Lo primero que se puede observar en esta ventana son las propiedades de los fluidos (frío y caliente), con sus respectivas unidades. Cabe resaltar que esta ventana sólo es de visualización, no podrán ser alterados los valores que allí se encuentren.
2. Para visualizar las gráficas de las propiedades antes mencionadas se tendrá que dar clic en alguno de los enlaces “ver gráfica”, mediante el enlace situado a la izquierda para el fluido frío y el enlace situado a la derecha para el fluido caliente. Las gráficas se muestran a continuación:



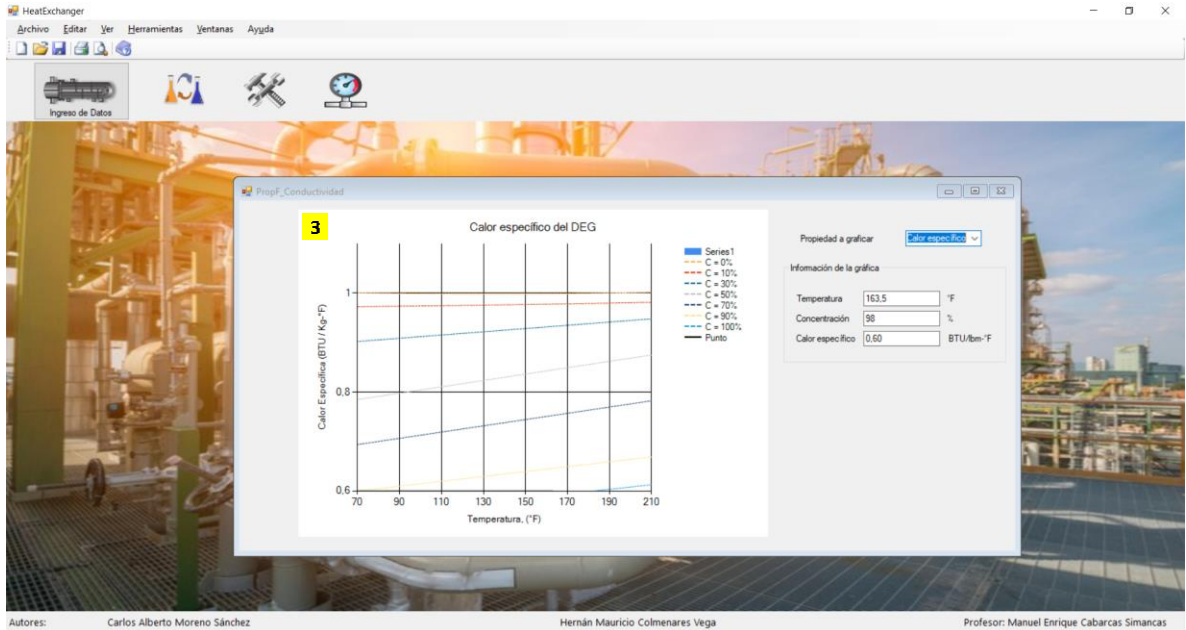
Fuente: Autores.

1. Este desplegable permite cambiar entre las cuatro propiedades que se tienen en cuenta en el proceso.



Fuente: Autores.

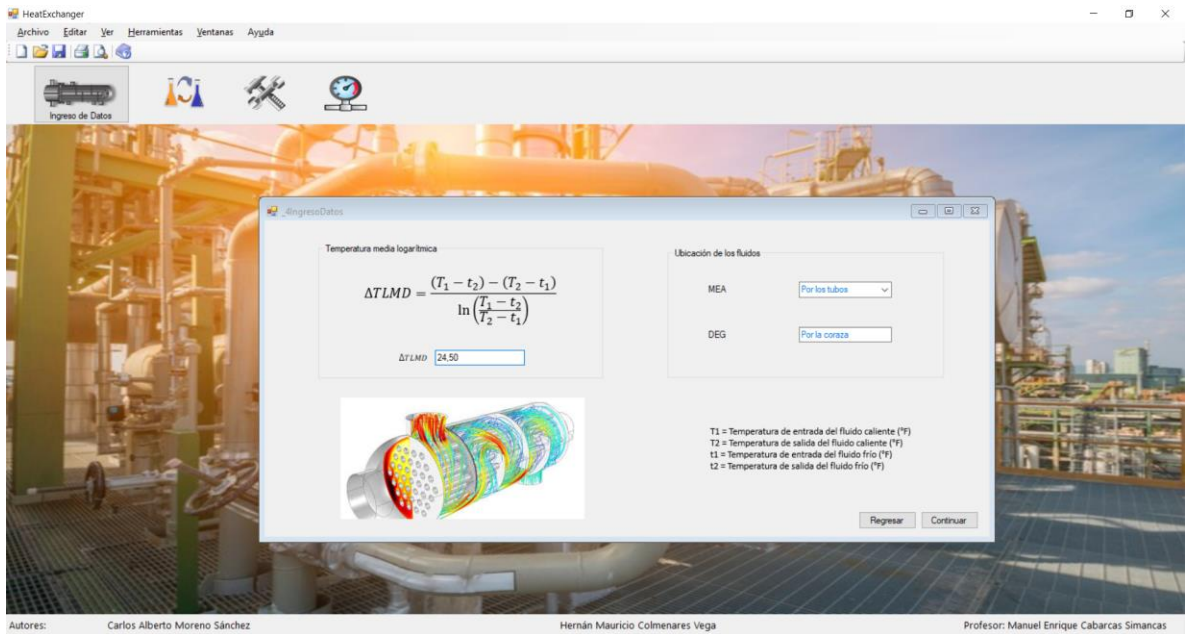
2. El recuadro permite ver los valores de temperatura, concentración a la cual se encuentra la propiedad seleccionada en el desplegable.



Fuente: Autores.

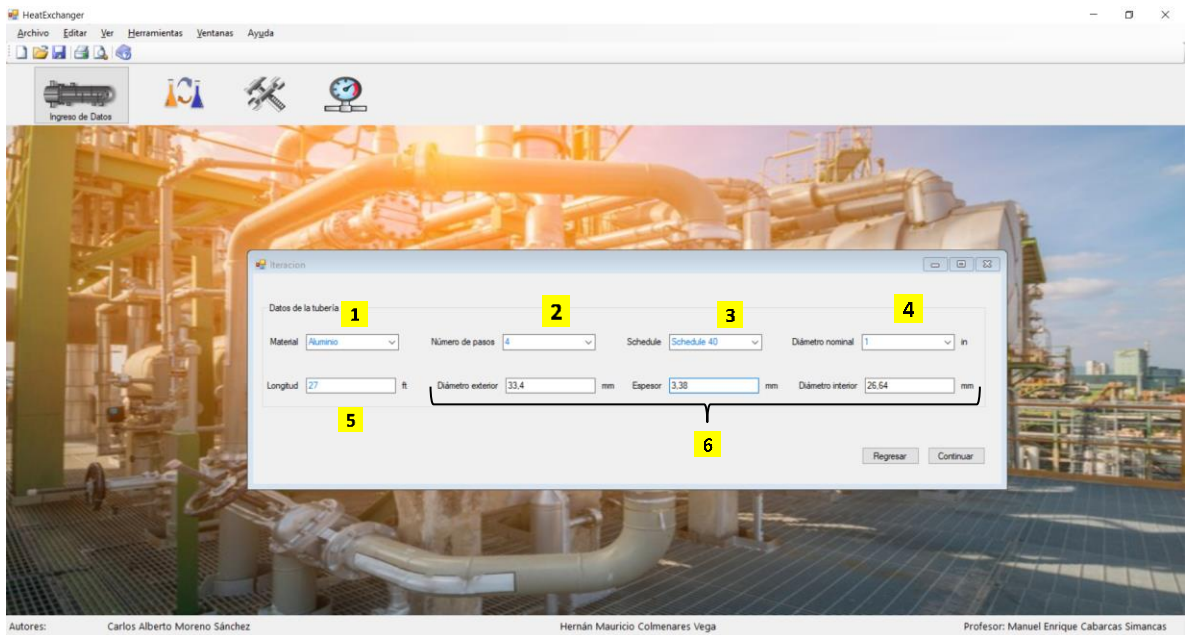
3. El último, pero no menos importante elemento que se muestra en esta ventana son las gráficas de cada propiedad que es seleccionada.

En la última ventana de este módulo la cual se muestra a continuación, el usuario observará la temperatura media logarítmica que tenga el caso que se está desarrollando y también deberá seleccionar el lado por el cual fluirá cada fluido a través del intercambiador (lado de los tubos o lado de la coraza).



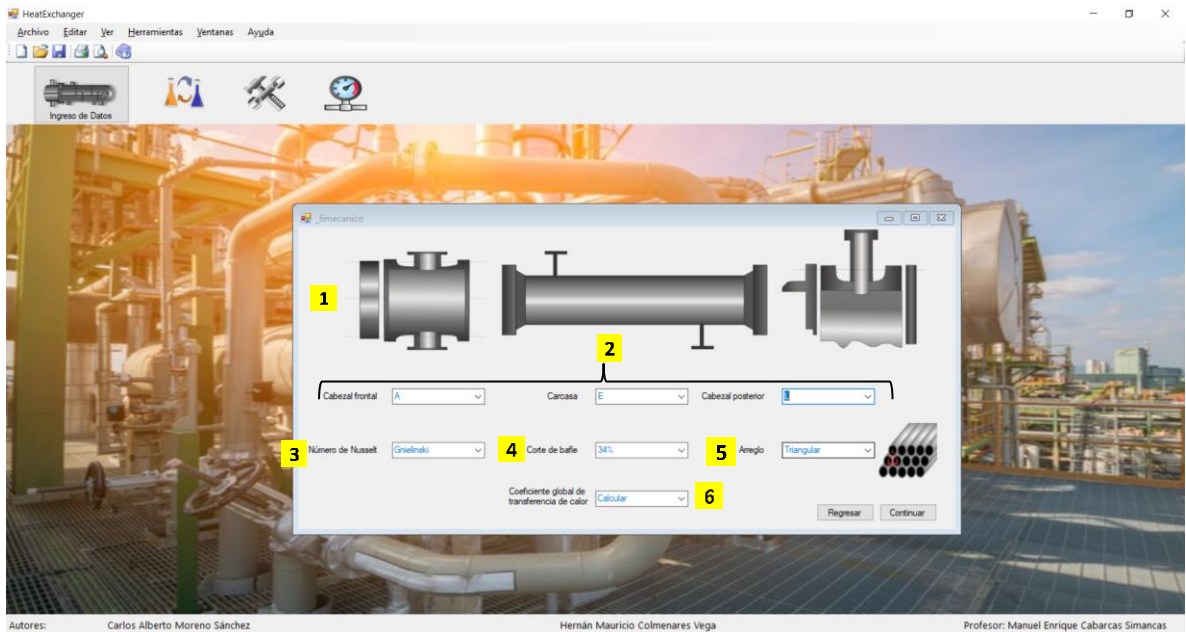
Fuente: Autores.

### Módulo de diseño mecánico.



Fuente: Autores.

1. Este primer desplegable permitirá al usuario elegir entre 4 diferentes materiales utilizados para la construcción del intercambiador los cuales son: Aluminio, acero, acero inoxidable y cobre.
2. El usuario deberá seleccionar el número de pasos por el lado de los tubos los cuales se encuentran en este desplegable. Se utilizan los números de pasos más comunes en la industria.
3. El desplegable "Schedule" permite al usuario elegir entre tres diferentes tipos de cédulas (espesor) de tubería. Los Schedule que trabaja este software son: Schedule 40, Schedule 60 y Schedule 80.
4. Una vez es seleccionada la Schedule de la tubería, el usuario tendrá que escoger el diámetro nominal de esta. En el desplegable vienen precargados los diámetros de tubería más comunes para intercambiadores de calor de tubos y coraza en plantas de gas natural.
5. La longitud de la tubería que tendrá el intercambiador deberá ser ingresada a consideración del usuario, este es el único dato que el software no tiene precargado en esta ventana.
6. Ya seleccionados el tipo de material, el Schedule y el diámetro nominal de la tubería, aparecerán en estos tres recuadros los valores de diámetro exterior, espesor y diámetro interior de cada tipo de tubería que sea seleccionado.



Fuente: Autores.

1. Al seleccionar la configuración del intercambiador (cabezales y coraza), se observará la respectiva silueta de cada componente elegido.
2. Se podrá elegir entre las diferentes configuraciones de cabezales y coraza más utilizados; para los cabezales frontales se tiene tipo A, tipo B y tipo C. Para los cabezales posteriores están el tipo L, tipo M y tipo N. Por último, se tiene las corazas tipo E, tipo F y tipo G.
3. Para el cálculo del número de Nusselt se tienen 3 opciones de correlaciones. Las correlaciones que se manejan son: correlación de Gnielinski, correlación de Kawase y Ulbrecht y correlación de Kawase y De.
4. Un valor importante es el corte de los baffles el cual se podrá elegir entre un rango de valores que va desde 25% hasta el 35%.
5. La tubería puede ir en 3 tipos de disposiciones o arreglos: arreglo cuadrado de 90°, arreglo cuadrado de 45° y arreglo triangular de 30°. Siendo este último el más utilizado.
6. Se tendrá la opción de ingresar el valor del coeficiente global de transferencia o elegir la opción para que el software realice el cálculo de este coeficiente.

Posteriormente se llegará a las ventanas donde se encuentran los resultados del proceso junto con sus respectivas ecuaciones para que el usuario además de conocer el resultado pueda aprender cuales variables intervienen en los cálculos.

HeatExchanger

Archivo Editar Ver Herramientas Ventanas Ayuda

Ingreso de Datos

respuestas\_mecanico

Área externa:   $A_{ext} = \frac{Q}{U_{sup} \cdot LMTD}$

Velocidad por los tubos:   $V_t = \frac{4 \cdot m_t \cdot NPT}{\rho_t \cdot PI \cdot D_{int}^2 \cdot NTT}$

Resistencia del cilindro:   $R_{cil} = \frac{\text{Log} \left( \frac{D_{ext}}{D_{int}} \right)}{2 \cdot PI \cdot L_{tubo} \cdot NPT \cdot K_{tubo}}$

Factor f:   $f = 1.375 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 1 + 21.544 \cdot \left( \frac{r}{r_c} + \frac{100}{Re_t} \right)^4 \right)$

Número total de tubos:   $NTT = \frac{A_{ext}}{D_{ext} \cdot PI \cdot L_{tubo}}$

Reynolds por los tubos:   $Re_t = \frac{\rho_t \cdot V_t \cdot D_{int}}{\mu_t} = 32.2$

Número de Prandtl:   $Pr_t = \frac{C_p \rho_t \cdot \mu_t}{K_t}$

Nomenclatura

- $A_{ext}$ : Área externa de los tubos (m<sup>2</sup>)
- $U$ : Coeficiente global de transferencia de calor ( $\frac{BTU}{ft^2 \cdot h \cdot ^\circ F}$ )
- $V_t$ : Velocidad del fluido en el tubo ( $\frac{ft}{s}$ )
- $NPT$ : Número de pasos de tubo
- $NTT$ : Número total de tubos
- $K_{tubo}$ : Conductividad térmica del tubo ( $\frac{BTU}{ft \cdot h \cdot ^\circ F}$ )
- $f$ : Factor f
- $\rho_t$ : Densidad de Prandtl
- $C_p$ : Calor específico ( $\frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F}$ )
- $\mu_t$ : Viscosidad (cP)

Regresar Continuar

Autores: Carlos Alberto Moreno Sánchez Hernán Mauricio Colmenares Vega Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Fuente: Autores.

HeatExchanger

Archivo Editar Ver Herramientas Ventanas Ayuda

Ingreso de Datos

Respuestas\_Mecanico

Número de Nusselt:   $Nut = 0.0471 \cdot Re_t \cdot (Pr_t)^{1/4} \cdot \left( 1.11 + 0.44 \cdot Pr_t^{-1/4} - 0.7 \cdot Pr_t^{-1/2} \right)$

H:   $Hi = \frac{K_{wi} \cdot Nut}{D_{int}}$

Constante B:   $B = 0.16 \cdot \left( \frac{0.625 + D_{ext}}{1.37 + 0.9968} \right)$

Dotl:   $Dotl = D_{ext} + B + \sqrt{C + B^2}$

Ltp:   $Ltp = 1.25 \cdot D_{ext}$

Constante C:   $C = \frac{1 + NTT \cdot Ltp^2}{0.758 + 0.9968}$

Nomenclatura

- $Nut$ : Número de Nusselt
- $Hi$ : Coeficiente de convección interno
- $Ltp$ : Pitch entre tubos (mm)
- $B$  y  $C$ : Constantes

Regresar Continuar

Autores: Carlos Alberto Moreno Sánchez Hernán Mauricio Colmenares Vega Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Fuente: Autores.

En cada ventana se puede observar resultados como lo son el área externa del intercambiador, velocidad del fluido que circula por lo tubos, números adimensionales necesarios para el diseño como Reynolds, Nusselt y Prandl. Así mismo un cuadro de nomenclatura de las ecuaciones que se encuentran en cada una de las ventanas.

### Módulo de pérdidas de presión

The screenshot shows the 'HeatExchanger' software interface. The main window is titled 'Caida\_presion' and displays two diagrams of a shell-and-tube heat exchanger. The left diagram shows flow through the tubes, and the right diagram shows flow through the shell. Below the diagrams are equations for calculating pressure loss in tubes and shells, along with input fields for various parameters and their calculated values.

**Caída de presión en los tubos**

$$h_t = f \cdot \frac{L}{D} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad h_s = K_s \left( \frac{v^2}{2g} \right) \cdot NPT$$

**Caída de presión en la coraza**

$$\Delta P = K_s \frac{(2N_R f' G_s^2)}{g_c \rho \Phi} \quad f' = b \left( \frac{D_o G_s}{\mu_b} \right)^{-0.5}$$
$$b = 0.23 + \frac{0.11}{(X_T - 1)^{1.08}} \quad X_T = \frac{LTP}{D_{ex}}$$

**Conveniones**

Pérdidas en la línea	0.001
Pérdidas en la entrada	0.016
Pérdidas en la salida	0.008
Pérdidas en el codo en U	0.009
Total Pérdidas	0.034
Total Caída de presión	68.371

$X_T$	3.030
$b$	1.300
Factor $f'$	0.000
Caída de presión	89.324

Autores: Carlos Alberto Moreno Sánchez, Hernán Mauricio Colmenares Vega, Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Fuente: Autores.

Este módulo es sólo de visualización debido a que el usuario ya ha realizado el ingreso de todas las variables requeridas, el software se encarga de realizar todos los cálculos pertinentes y se podrán observar las perdidas por presión que se tuvo en el lado de la coraza y del lado de los tubos, con sus respectivas ecuaciones.