

UNIVERSIDAD DE  
GUANAJUATO



**Integración de Sistemas Secundarios de Enfriamiento en Procesos Industriales**

**Maestría en Ciencias en Ingeniería Química  
(Integración de Procesos)**

Presenta:

**IQ Saúl Martínez Castañeda**

División de Ciencias Naturales y Exactas

Director

**Dr. Martin Picón Núñez**

Codirector

**Hebert Gerardo Lugo Granados**

28 de noviembre del 2022

# **Sinodales Propuestos**

Dr. Zeferino Gamiño Arroyo

Dr. Jesus Isaac Minchaca Mojica

Dr. Héctor Hernández Escoto

# **Sinodal Suplente**

Dr. Tzayan Pérez Segura

# Resumen

La integración de sistemas de enfriamiento secundarios en procesos industriales es una forma efectiva de reducir la carga térmica de las torres de enfriamiento (**TE**), la incrustación, el consumo y gasto de agua fresca de repuesto en un sistema de enfriamiento, sobre todo en lugares en donde el agua escasea. Si la carga térmica de un sistema de enfriamiento secundarios (**SES**) es elevada, la **TE** consume menor cantidad de agua y electricidad, pero el costo y el consumo de energía de los **SES** es elevado. El presente trabajo evalúa técnico y económicamente dos opciones de integración: Enfriador de Aire y Chiller para Agua, y la opción del reemplazo de la **TE**: (1) Sin modificar la carga térmica del proceso (**Q**) y (2) Aumentando la **Q** del proceso; el ventilador y la bomba de recirculación de la **TE**. Se considera el uso de variadores de frecuencia en el Chiller y el Enfriador, para modificar la velocidad de operación en función de la **Q** requerida, ya que el desempeño de los equipos depende de las condiciones ambientales y temporales del sitio de instalación. Se analiza un caso de estudio donde el reemplazo de la **TE** representa: (1) un costo de la inversión del 11% y (2) en el consumo de servicios adicionales (electricidad y agua de repuesto) un 11% vs. integración de 3 chillers para agua. La integración de un **Enfriador para Aire en el lado del agua de enfriamiento (AE) no brinda resultados satisfactorios.**

Para obtener una temperatura de salida del agua de enfriamiento ( $T_{Lout}$ ) de un intercambiador de calor (**IC**) de cada ramal de la red de intercambio de calor (**RIC**) más uniforme, se modificó el arreglo de los **IC** de la **RIC** de serie-paralelo a paralelo. La concentración de carbonato de calcio [**CaCO<sub>3</sub>**] en el agua fresca de repuesto a la **TE** es un parámetro muy importante, ya que el ensuciamiento y la pérdida de **Q** son mayores a una [**CaCO<sub>3</sub>**] mayor.

# Contenido

	Págs.
<b>Capítulo 1.</b> Introducción.....	5
1.1. Justificación.....	6
1.2. Descripción del trabajo.....	7
1.3. Hipótesis .....	7
1.4. Objetivo General y objetivos Específicos.....	8
1.5. Lógica de Análisis al Proceso.....	8
1.6. Organización del trabajo.....	9
<b>Capítulo 2.</b> Estado del arte .....	11
<b>Capítulo 3.</b> Descripción de la metodología de análisis.....	14
<b>Capítulo 4.</b> Ensuciamiento por incrustación en redes de enfriamiento .....	18
<b>Capítulo 5.</b> Diseño y simulación de torres de enfriamiento de flujo cruzado.....	23
<b>Capítulo 6.</b> Sistema de enfriamiento secundarios	
6.1. Enfriadores de aire.....	36
6.2. Chillers para Agua .....	50
<b>Capítulo 7.</b> Distribución de flujo en redes de enfriamiento.....	62
<b>Capítulo 8.</b> Diseño de Intercambiadores de Calor.....	68
<b>Capítulo 9.</b> Casos de estudio.....	73
Conclusiones y trabajo futuro.....	106
<b>Capítulo 10.</b> Referencias.....	108
Nomenclatura.....	112
<b>Capítulo 11.</b> Apéndices. Programas en EES.....	119

# Capítulo 1

# Capítulo 1.

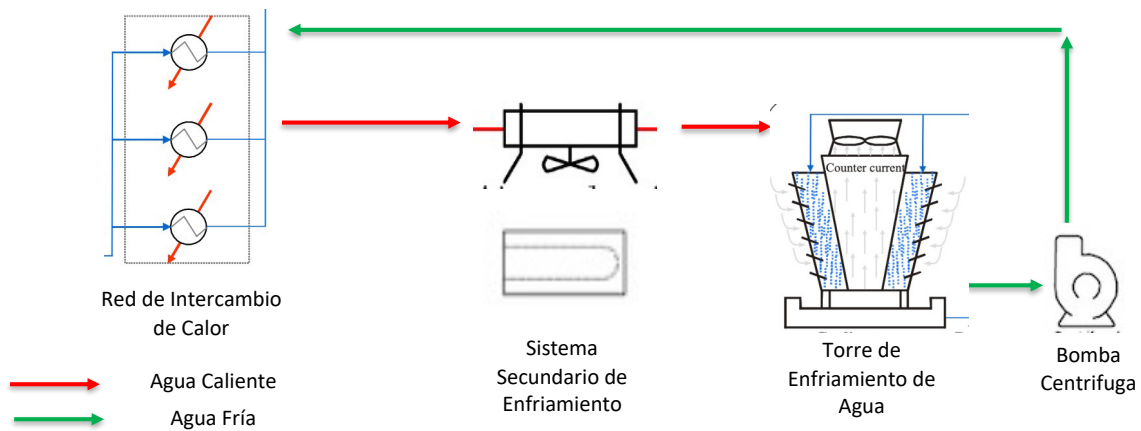
## Introducción

El “ensuciamiento” en un sistema de enfriamiento se debe a diversos factores, entre ellos: la calidad del agua (dureza), tratamiento inadecuado, temperatura elevada del agua retorno del proceso  $>50^{\circ}\text{C}$  y baja velocidad a través de los sistemas de intercambio de calor. Se ha observado que a estas temperaturas la solubilidad de las sales disminuye y el ensuciamiento aumenta. El ensuciamiento aumenta el consumo de energía eléctrica, debido al incremento de la caída de presión originada por el aumento de la resistencia al flujo originado por la precipitación de sales y a la disminución del área transversal. Esta situación genera pérdida de la producción debido al paro de equipos para su limpieza y/o a la disminución de la carga térmica transferida, por lo cual es necesario minimizarlo. Existen varias opciones para disminuir el ensuciamiento. Este trabajo se enfoca a reducir los niveles de temperatura del agua de retorno a una torre de enfriamiento, instalando un sistema secundario en el lado agua. El tipo de problema específico que se aborda en este trabajo es aquel en el cual la torre de enfriamiento en operación se encuentra al límite de su capacidad.

Se implementa un modelo termo-hidráulico para la integración de sistemas secundarios de enfriamiento, con el objeto de disminuir la carga térmica de la torre de enfriamiento, la temperatura de retorno y como consecuencia el ensuciamiento en los equipos de proceso. Al integrar un sistema secundario de enfriamiento en un sistema en operación, se redistribuyen los flujos de agua en los ramales debido a la variación de la caída de presión y modifica la dinámica del ensuciamiento (**Figura 1**).

Las opciones para integración son:

1. Enfriador de Aire.
2. Chiller para Agua.



**Fig. 1.1 Diagrama de una Red de Enfriamiento con la Integración de un Sistema Secundario.**

## 1.1. Justificación

Al integrar un enfriador secundario a un sistema de enfriamiento en operación, disminuirá la temperatura del agua de retorno, así como el ensuciamiento en la **RIC**. De esta forma se alargarán los tiempos entre paros por limpieza de la **RIC**, se disminuye la pérdida de capacidad y aumenta la producción, se libera carga térmica del sistema en operación, ya que el mismo se encuentra al límite de su capacidad.

Otros beneficios que conlleva esta propuesta es el ahorro en el consumo de agua fresca de repuesto a la torre de enfriamiento, ya que existe una menor evaporación. Hoy en día, existen limitaciones importantes de la disponibilidad de agua en muchas partes del mundo. Cuando este tipo de propuestas son rentables, su aplicación es a corto plazo.

## 1.2. Descripción del trabajo

Se utiliza el software **Engineering Equation Solver (EES) V9.944-3D** para el diseño, programación y simulación de:

- Torre de enfriamiento de flujo cruzado.
- Enfriador de aire.
- Chiller para agua.

Y la versión **6.804 (05/20/03)** Para:

- Red de intercambio de calor.

Se busca reducir la temperatura del agua de enfriamiento de la red de enfriamiento, disminuyendo así el incrustamiento en los equipos, ahorrar agua de repuesto a la torre de enfriamiento y de electricidad. Se evalúa la redistribución de flujos y caídas de presión en redes de intercambio de calor debido a la incrustación. Se analizan diferentes escenarios para encontrar la opción más viable de sistema secundario de enfriamiento.

## 1.3. Hipótesis

La integración de un sistema secundario o el reemplazo de la **TE** de mayor capacidad a una red con torre de enfriamiento en operación disminuye la temperatura de retorno del agua de cada **IC**, de tal forma que se reduce la generación de ensuciamiento en la **RIC**. El consumo de agua fresca de repuesto genera una redistribución de los flujos de agua y cambios de la velocidad de ensuciamiento en los ramales.



## 1.4. Objetivo General

Establecer la metodología para la integración de sistemas secundarios a redes de enfriamiento en operación que se encuentran al límite de su capacidad.

### 1.4.1. Objetivos Específicos

1. Desarrollar un modelo termo-hidráulico para la modificación de sistemas de enfriamiento a través de la incorporación de enfriadores con aire o sistemas de refrigeración.
2. Analizar el efecto de la integración de sistemas secundarios en la redistribución de flujos y ensuciamiento en redes de enfriamiento (RE).
3. Analizar técnico-económicamente la selección de sistemas secundarios de enfriamiento.

## 1.5. Lógica de Análisis al Proceso.

En la Fig. 1.2 se muestra el mapa mental de la RE que está operando al límite de su capacidad de diseño y las alternativas para corregir el problema.

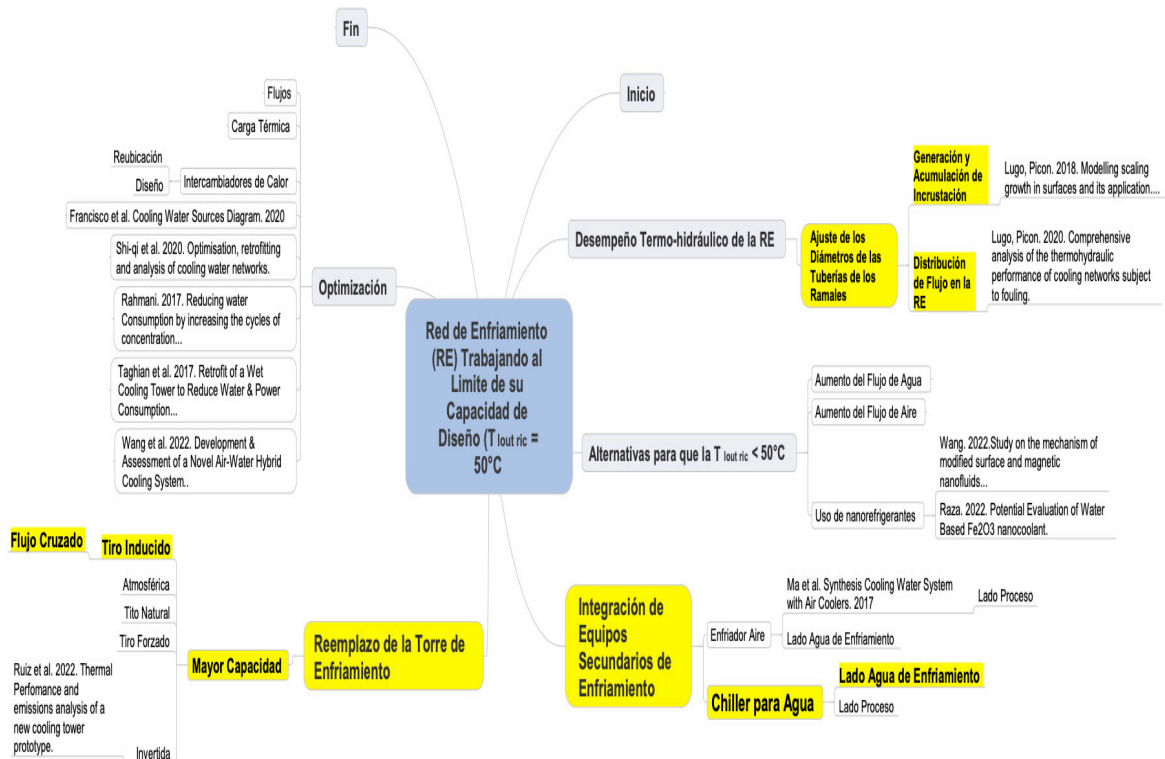


Fig. 1.2. Lógica de Análisis al Proceso de una RE que está operando al Límite de su Capacidad de Diseño

## 1.6. Organización del trabajo

El presente trabajo está organizado de la siguiente forma: El **Capítulo 1** contiene la introducción, justificación, descripción del trabajo, objetivo general y específicos. El **Capítulo 2** contiene la revisión y análisis del estado del arte, mientras que el **Capítulo 3** contiene la metodología de análisis. En el **Capítulo 4** se presenta la revisión y análisis del método teórico utilizado para el análisis del ensuciamiento por incrustación en redes de enfriamiento. La metodología utilizada para el diseño y simulación de torres de enfriamiento de flujo cruzado se presenta en el **Capítulo 5**. El **Capítulo 6** contiene la metodología utilizada para el diseño y simulación de sistema de enfriamiento secundarios, mientras que el **Capítulo 7** contiene la metodología utilizada para el diseño y simulación de distribución de flujo en redes de enfriamiento. La metodología que se utiliza para el diseño y costeo de Intercambiadores de Calor de Tubos y Coraza se presenta en el **Capítulo 8**, el **Capítulo 9** contiene el análisis y resolución de los Casos de estudio. Las conclusiones de la tesis y el trabajo futuro se presentan en el **Capítulo 10**. Mientras que el **Capítulo 11** contiene los Apéndices.

# Capítulo 2

# Capítulo 2.

## Estado del Arte.

Una revisión de la literatura permite identificar los modelos desarrollados para el comportamiento de la distribución de flujo, ensuciamiento e integración de sistemas secundarios en redes de enfriamiento.

En un estudio para determinar la composición de la dureza del agua, **Paakkonen (2015)** determinó que alrededor del 90% de la dureza del agua está compuesta de  $\text{CaCO}_3$ , por lo cual la dureza puede ser considerada como el contenido principal de esta sal en el agua. En un estudio para la disminución de emisiones de una **TE** invertida, **Ruiz y Navarro (2022)** redujeron significativamente las emisiones de agua y partículas vs. una **TE** convencional; el modelo invertido posee una configuración diferente a la tradicional, los flujos del aire y agua son paralelos, posee más eliminadores de niebla lo que disminuye la evaporación de agua. En un estudio de optimización y readecuación de **RE**, **Shi-qi et al. (2021)** desarrollaron dos modelos con la integración intermedia de un cabezal receptor de agua; combinaron el uso de turbinas, bombas principales y auxiliares, obtuvieron ahorros notables en el consumo de energía eléctrica. En un estudio de la estructura de una **RE** para disminuir el consumo de servicios y costos operativos, **Francisco et al. (2020)** simplificaron la misma a través de una configuración serie-paralelo; redujeron el flujo de agua circulante, el consumo de agua fresca y los costos operativos e incrementaron la eficiencia, sin afectar la carga térmica removida de los intercambiadores de calor del proceso. En un estudio para el desarrollo de una estrategia dinámica para enfriar aceite vegetal, **Melgaco y Pereira (2019)** redujeron el consumo de electricidad en bombas y ventiladores de un sistema híbrido de agua de enfriamiento al variar las condiciones de operación. En un estudio de análisis del diseño de enfriadores de aire tipo A, **Luceño y Martín. (2018)** generaron un procedimiento con y sin mantenimiento para el diseño bajo condiciones de ensuciamiento y con reducción del consumo de electricidad. En un estudio para reducir el consumo de agua fresca de repuesto de una **TE** sin ocasionar problemas de ensuciamiento y corrosión, **Rahmani (2017)** redujo el consumo al incrementar los ciclos de concentración y disminuir la cantidad de purga de fondo de la **TE**; evaluó los efectos favorables de la adición de inhibidores de incrustación y corrosión. En un estudio de readecuación de una **TE** en operación de configuración paralela, **Dehaghani y Ahmadikia (2017)** redujeron el consumo de agua de repuesto y el consumo de potencia del ventilador por medio de control de flujo de aire al variar la velocidad del motor.

### **Modelo de Distribucion de Flujo y Ensuciamiento en Redes de Enfriamiento**

En un estudio para desarrollar una guía para adicionar nuevos **IC** en serie o paralelo en una **RE** sujeta a readecuación, **Lugo y Picón (2020)** consideraron los efectos de la velocidad del agua de enfriamiento, el ensuciamiento y los cambios termo-hidráulicos. En un estudio para desarrollar un modelo para predecir el incrustamiento en **IC** tubulares **Lugo y Picón (2018)** consideraron los efectos del tiempo de operación, velocidad, temperatura, dureza y pH del agua de enfriamiento; evaluando el desempeño termo-hidráulico del **IC**, en ninguno de los estudios se consideraron las estrategias para disminuir la  $T_{Lout}$  de los ramales de la **RIC**.

### **Modelo de Adicion de Enfriadores de Aire a un Sistema de Enfriamiento de Agua**

En un estudio para desarrollar un método para adicionar enfriadores de aire en una corriente de proceso, **Wang et al. (2017)** redujeron la carga térmica, los costos de operación de la **TE**; obtuvieron ahorro de agua fresca de repuesto a la **TE**; evaluaron el comportamiento termo hidráulico y optimizaron económicamente la integración de **EA**, pero no evaluaron los efectos del ensuciamiento en los equipos de intercambio de calor, ni la integración en el lado del **AE**.

En base a lo revisado, se observa que existe la oportunidad de estudiar los efectos que tendrá la integración de sistemas secundarios en el lado **AE** o el reemplazo de la **TE** por una de mayor capacidad en **RE** que operan al límite de su capacidad. Este tipo de acciones permitirán reducir temperaturas de operación que tendrán un efecto positivo en el ensuciamiento. Por otro lado, se trabajará un modelo de redistribución de flujo para analizar el impacto en la operación de la **RIC**. Se analizarán las estrategias para obtener  $T_{Lout} < 50^{\circ}\text{C}$  en cada ramal de la **RIC**.

A nivel industrial es muy común observar sistemas de enfriamiento de agua con falta de cuidado y de mantenimiento, operando al límite o fuera de su capacidad de diseño.

# Capítulo 3

# Capítulo 3.

## Descipcion de la Metodología de Analisis

### Notas Generales para todo el Documento:

*En la descripción de cada una de los **Sistemas, Equipos, Variables y Parámetros** están explicadas en la **Nomenclatura**, por lo tanto, no se definirían nuevamente.*

*La  $\Delta T_{Hout}$  **máx.** Considerada para todo el presente trabajo es  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .*

### Metodología de Análisis:

La metodología general de análisis se presenta en la **Figura 3.1** De una manera general, las etapas fueron las siguientes:

Se genero el programa en **EES** para el **Diseño y Simulación de la Operación de una TE de Tiro Inducido Flujo Cruzado (TETIFC)** y se verifiko que funcionara adecuadamente.

Se genero el programa en **EES** para la **Distribución de Flujo en Redes de Enfriamiento (DFRE)** incluyendo el comportamiento termo-hidráulico y se verifiko que funcionara adecuadamente.

Se corrió nuevamente los programas con los datos del **Caso de Estudio** seleccionado, si todas las  $T_{Lout\ IC} > 50^{\circ}\text{C}$  se continuo con el **siguiente punto**. En caso contrario se pasó al punto de cálculo la **Q** del **SES**.

Se ajustaron los **Lv** de los ramales de alimentación de cada **IC** modificando los  $\phi$  de las tuberías con la finalidad de que todas las  $T_{Lout\ IC} < 50^{\circ}\text{C}$  y que fueran lo más uniforme entre ellas para evitar mezclas de **AE** con diferencia considerable de temperatura; se verifiko que las  $u_t$  y la **dP IC** estuvieran dentro de los parámetros definidos. Si esta estrategia no funciona regrese los  $\phi$  a sus valores iniciales y pase al siguiente punto.

Se determino la **Qi** a transferir para que las  $T_{Lout\ IC}$  y  $T_{Lout\ RIC}$  fueran menores a  $50^{\circ}\text{C}$ ; para el caso del **SES** se seleccionaron de las fichas técnicas de los fabricantes [1 y 2] la capacidad más cercana a **Qi**, verifiko que se cumpla con los requerimientos del proceso (**Lv**, **dP**, etc.) y se calcularon la cantidad de equipos necesarios para cumplir con la **Qi**. Para el caso del reemplazo

de la **TE** de mayor capacidad diseñe, se simulo y verifico que la operación fuera adecuada, se determinó el costo estimado de esta y la(s) bomba(s) de recirculación de **AE** necesarias.

Se determino la **dP<sub>RE</sub>**, el consumo y costo de la electricidad y del agua fresca de repuesto.

Si la **dP RE > máx. Definida**, se evaluó como afecta a la potencia y consumo eléctrico de los motores de los equipos que componen la **RE**, si la afectación fue considerable se disminuyó el **L<sub>v</sub>** y se repitió los cálculos a partir de la **Q<sub>i</sub>**. En caso contrario se continuo con el siguiente punto.

Se determino el costo estimado de la **TE** de mayor capacidad, así como de la bomba de recirculación de **AE**, se cotizaron los **SES**.

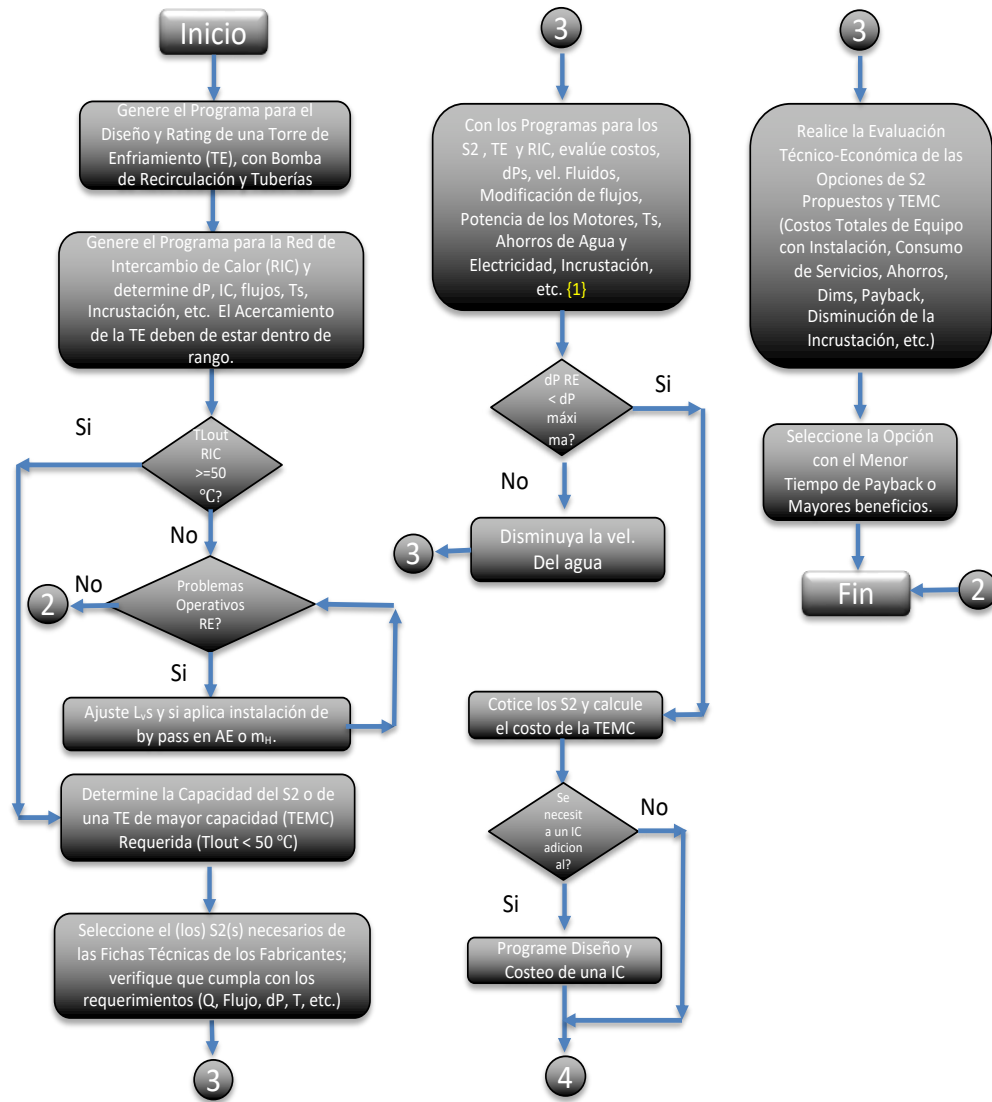
Si se requirió de un **IC** adicional para cumplir con los requerimientos del proceso, se diseñó y costeo, en caso contrario se continuo con el siguiente punto.

Se genero la evaluación técnico-económica de las opciones que funcionan adecuadamente para los objetivos del estudio; se incluyeron costos totales de equipo y de instalación, así como los consumos y costos de agua fresca y electricidad; ahorros, payback, etc.

Se selecciono la mejor opción en base a payback, costos de equipos y consumo de servicios, disponibilidad de agua fresca, emisiones, etc.



La lógica general para el **diseño de la Integración de un SSE o el Reemplazo de la TE de una RE** se encuentra definida en la **Fig. 3.1**:



**Fig. 3.1. Algoritmo para la Integración de un SSE a una RE.**

**Notas:**

1. Al variar los flujos del Aire y AE debe verificar que la  $T_{out} \text{ RIC} < 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
2. Todos los programas deben incluir las tuberías, accesorios y válvulas de los equipos.

# Capítulo 4

# Capítulo 4.

## Ensuciamiento por incrustacion en redes de enfriamiento.

La incrustación de los equipos, tuberías y válvulas de una **RE** se debe al contenido de sales y las condiciones inadecuadas de operación.

En la operación de equipos de intercambio de calor, el incrustamiento es un problema común que deteriora el desempeño termo hidráulico de los equipos con respecto al tiempo. La mayor parte de los tipos de ensuciamiento son una combinación compleja de mecanismos, los cuales dificultan su predicción.

Las sigs. condiciones de operación son determinantes para el incremento de la incrustación:

1. A **pH** > **8** del agua de enfriamiento.
2. A **T** >= **50°C** del agua de enfriamiento.
3. A **u** < **1.5  $\frac{m}{s}$**  del agua de enfriamiento.
4. En longitudes largas de los tubos del **IC**.
5. La incrustación incrementa la **dP** y potencia demandada de la **BR**, disminuye y redistribuye los **V** y las **Q** transferida, provoca paros de la **RE** para limpieza y pérdida de capacidad.

En este trabajo se integraron un par de opciones de **SSE** a una **RE** con el objetivo de disminuir la **T<sub>Lout</sub>** **RIC** < **50°C** y como consecuencia de la disminución de la incrustación sin alterar y aumentando la **Q** del proceso.

Existen varios modelos teoricos para el análisis del ensuciamiento por incrustación en las **RE**, en este trabajo se consideró el desarrollado por **Lugo & Picón (2018)** ya que sus resultados fueron más congruentes con los resultados típicos.

La mayoría de los modelos están basados en el mecanismo fisico de la generacion de incrustamiento propuesto por **Hasson et al. (1968)**, el cual es utilizado en el nuevo modelo. La transferencia de masa por difusion de los iones **Ca<sup>2+</sup>** y **CO<sub>3</sub><sup>-</sup>** a traves de la capa laminar están dados por las sigs. Ecuaciones:

$$m_d = \beta ([C_1]_b - [C_1]_i) \quad (4.1)$$

$$m_d = \beta ([C_2]_b - [C_2]_i) \quad (4.2)$$

Los iones reacciones y generan  $\text{CaCO}_3$  con lo cual la depositacion ocurre. La  $m_d$  puede ser expresada como sigue:

$$m_d = k_r ([C_1]_i * [C_2]_i - k_{sp}) \quad (4.3)$$

$k_r$  se obtiene de la **Ecuación De Arrhenius**:

$$k_r = k_0 * e^{\frac{E}{RT_i}} \quad (4.4)$$

Despejando  $[C_2]_i$  y  $[C_1]_i$  de las **Ecuaciones 4.1 y 4.2**, sustituyendo en la **Ecuación 4.3**:

$$m_d = k_r \left\{ \left( [C_2]_b - \frac{m_d}{\beta} \right) \left( [C_1]_b - \frac{m_d}{\beta} \right) - k_{sp} \right\} \quad (4.5)$$

Si la  $u$  se incrementa, las fuerzas inerciales y viscosas se incrementan lo cual origina una disminución del espesor de la capa laminar y por lo tanto una reducción en la velocidad de reacción. Como consecuencia de, la formación de incrustamiento disminuye al igual que el ensuciamiento. Del **teorema  $\pi$  de Buckingham Boyling (1979)** se demostró que  $f$  afecta a  $md$ :

$$f = \frac{\tau}{\rho u^2} \quad (4.6)$$

Un caso común es que cuando  $\delta$  es igual a  $R_r$ ,  $f$  depende del  $Re$  y  $R_r$  para tuberías comerciales:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left\{ \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{R_r}{3.71 D} \right\} \quad (4.7)$$

$f$  está relacionado con la resistencia al flujo en la superficie de la capa de ensuciamiento. El nuevo factor empírico ( $\alpha$ ) sera utilizado,  $a$  y  $b$  son determinadas experimentalmente.

$$\alpha = a (f Re)^b \quad (4.8)$$

Sustituyendo la ecuación **4.8** en la **4.5**:

$$m_d = \frac{\beta}{2} \left( \frac{\beta}{\alpha k_r} + (C_1 + C_2) - \sqrt{\frac{(\beta + (C_1 + C_2)\alpha k_r)^2 + 4\alpha^2 k_r (K_{sp} - [C_1][C_2])}{\alpha^2 k_r}} \right) \quad (4.9)$$

La **ecuación 4.9** representa el nuevo modelo para la predicción de la depositación de incrustación. La  $K_{ps}$  del  $\text{CaCO}_3$  se puede calcular con la siguiente Ecuación:

$$\begin{aligned}
 K_{ps} = & -1.66 \times 10^{-10} T^3 + 9.42 \times 10^{-8} T^2 - 2.37 \times 10^{-5} T \\
 & + 1.89215841 \times 10^{-1} - 6.50551574 \times 10^{-2} \text{pH} \\
 & + 7.51805208 \times 10^{-3} \text{pH}^2 - 2.89928230 \times 10^{-4} \text{pH}^3
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

$R_s$  puede ser determinada con la siguiente Ecuación:

$$\frac{dR_s}{dt} = \frac{\dot{m}_d - \dot{m}_r}{\rho_f \lambda_f}
 \tag{4.11}$$

$R_{s,t}$  puede ser expresada de acuerdo con:

$$R_{s,t} = \frac{x_{f,t}}{\lambda_f}
 \tag{4.12}$$

$x_{f,t}$  puede ser expresada de acuerdo con:

$$x_{f,t} = \frac{t \dot{m}_d}{\rho_f}
 \tag{4.13}$$

$m_r$  y  $C_r$  puede ser calculados de:

$$\dot{m}_r = C_r \dot{m}_d
 \tag{4.14}$$

$$C_r = \frac{0.00212 u^2}{\Psi \lambda_f^{0.5}}
 \tag{4.15}$$

$\Psi$  tiene un valor mínimo de **0.002** no tiene límite en su valor máx.  $0 < C_r < 1$ .  $\Psi$  puede ser calculado de acuerdo con las siguiente Ecuaciones:

$$\Psi(t) = 1, t = 1
 \tag{4.16}$$

$$\Psi(t) = 0.99 \Psi, t > 1
 \tag{4.17}$$

$\beta$  se puede calcular con la siguiente Ecuación:

$$\beta = \frac{D_{AB} Sh}{X} \quad (4.18)$$

Para la capa limite turbulenta, **Sh** está dado por:

$$Sh = 0.029 Re_x^{\frac{4}{5}} Sc^{-\frac{2}{3}} \text{ para } Re > 3 \times 10^5 \quad (4.19)$$

La long. caracteristica es igual al diametro del tubo. El **Re** y **Sc** están dados por:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (4.20)$$

$$Re = \frac{\bar{u} \rho d}{\mu} \quad (4.21)$$

$$Re_x = \frac{\bar{u} \rho x}{\mu} \quad (4.22)$$

El parámetro **a** puede ser determinado con la siguiente Ecuación:

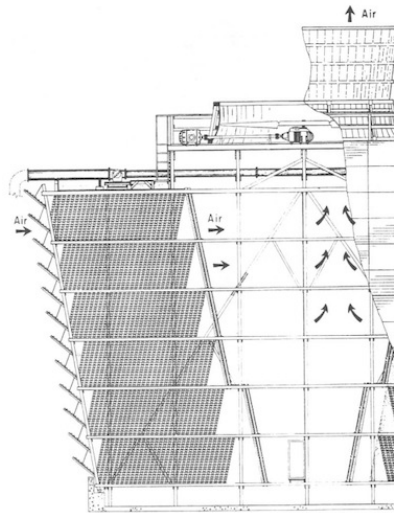
$$a = 191.5 Re^{-0.67} \quad (4.23)$$

# Capítulo 5

# Capítulo 5.

## Diseño y simulación de torres de enfriamiento inducida de flujo cruzado (TEIFC)

La Fig. 5.1 muestra una TEIFC:



**Fig. 5.1. Esquema de una TEIFC.**

Este capítulo se desglosará en 2 secciones, la 5.1 para el **diseño** de la TE y el 5.2 para la **Simulación de la operación de la TE**.

### 5.1. *Diseño de la TE*

En el diseño de una TE un dato fundamental es la **Pb** de la localización de esta.

Es también muy importante obtener de fuente confiable (p. e. Conagua) la estadística mensual promedio de la **T<sub>BH</sub>** y **T<sub>BS</sub>** de la localización de la TE.

Se obtuvieron las **CO** de la TE (**T<sub>Lin TE</sub>**, **T<sub>Lout TE</sub>** y **L<sub>v</sub>**), con la finalidad de para evitar cruces de T se generaron los diagramas de T, considere el **dT<sub>min</sub> >= 10°C**. Vea la **fig. 5.2**:



### Diagrama de Temperaturas:

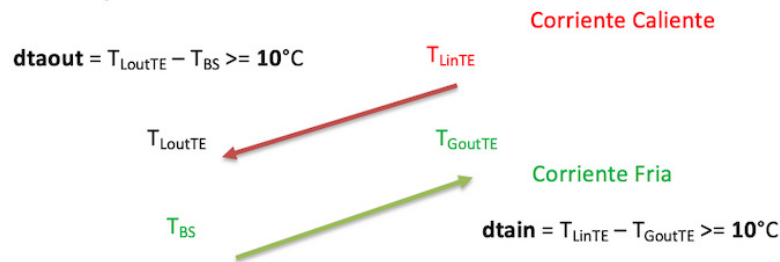


Fig. 5.2. Diagrama de Temperaturas para la CH y CC.

Se determinó con el EES a las CO:  $\rho_{Lp}$ ,  $Cp_{Lp}$ ,  $\mu_{Lp}$  y  $k_{Lp}$ .

De la Ecuación De la densidad, se despejó y calculó el  $L_m$ :

$$L_m = L_{vc} * \rho_{Lp} \quad (5.1)$$

El balance de energía se calculó Q de la RIC:

$$Q = L_m * Cp_L * (T_{Loutric} - T_{Linric}) \quad (5.2)$$

### Green (2019) Estableció los sigs. cálculos y rangos:

Se calculó el Rango de la TE con la siguiente ecuación:

$$Rango = T_{LinTE} - T_{LoutTE} \quad (5.3)$$

Se calculó el Acercamiento con la siguiente ecuación:

$$Acercamiento = T_{LoutTE} - T_{BH} \quad (5.4)$$

### Notas:

a) El valor del Acercamiento máx. =  $3^\circ C$ .

b) Si el valor del Acercamiento  $> 3^\circ C$ , ajuste la  $T_{LoutTE}$  hasta que se cumpla con la condición.

Como no se tenía el valor de  $G_s$ , se supuso un valor que estaba dentro del rango de la relación, se despejó y calculó  $G_s$ :

$$\frac{Lm}{Gs} = 0.75 \text{ a } 1.5$$

Se definió  $Ni = 20$ .

**Mashaf et al. (2020) Establecieron los sigs. Cálculos:**

Se calculó el **NTU** con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \text{NTU} = & \frac{4.19 * Ni * Lm(T_{LinTE} - T_{LoutTE})}{1.51x10^{-4}T_{LoutTE}^3 + (5.56x10^{-4}T_{LinTE} - 6x10^{-3})T_{LoutTE}^2} + \\
 & \frac{4.19 * Ni * Lm(T_{LinTE} - T_{LoutTE})}{(1.1556 - 0.014T_{LinTE} + 6.8x10^{-4}) * T_{LoutTE} + 2.7x10^{-4}T_{LinTE}^3 - 9x10^{-3}T_{LinTE}^2} \\
 & \frac{4.19 * Ni * Lm(T_{LinTE} - T_{LoutTE})}{1.41 T_{LinTE} - 2.568 T_{BH} + 0.029T_{BH}^2 - 0.0016T_{BH}^3 - 2.095(Ni + 1) \frac{Lm}{Gs} (T_{LinTE} - T_{LoutTE})} \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

**Nota:**

Se fija en el programa el valor del **NTU** para simular la operación de la **TE**.

Se calculo la  $T_{LoutTE}$  con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 & 1.51x10^{-4}T_{LoutTE}^3 + (5.56x10^{-4}T_{LinTE} - 6x10^{-3})T_{LoutTE}^2 + \{1.1556 - 0.014T_{LinTE} + \\
 & 6.8x10^{-4}T_{LinTE}^2 + 2.095(Ni+1)\frac{Lm}{Gs} + 4.19\frac{Ni}{NTU}Lm\}T_{LoutTE} + 2.7x10^{-4}T_{LinTE}^3 - \\
 & 9x10^{-3}T_{LinTE}^2 + \{1.4124 - 2.095(Ni + 1) \frac{Lm}{Gs} - 4.19\frac{Ni}{NTU}Lm\}T_{LinTE} - 2.568T_{BH} + \\
 & 0.0293T_{BH}^2 - 0.00166T_{BH}^3 = Y = 0 \quad (5.6)
 \end{aligned}$$

**Ludwig E. E. (1997) Establecio los sigs. Calculos para el diseño de una TE:**

De la **Tabla 5.1** se selecciono el tipo de empaque de la **TE**, se identificaron los valores de los parametros **A**, **n** y **S**:

**Tabla 5.1. Valores de A, n y S para Diferentes Empaques de las TE.**

Parámetros para el uso de la correlación			
Tipo	A	n	S in
A	0.06	0.62	9
B	0.07	0.62	12
C	0.092	0.6	115
D	0.119	0.58	24
E	0.11	0.46	24
F	0.1	0.51	24
G	0.104	0.57	24
H	0.127	0.47	24
I	0.135	0.57	24
J	0.103	0.54	24

De la **Ecuación De la Correlacion de Kelly-Swenson**, se despejo y calculó **N**:

$$N = \frac{NTU}{A * \left(\frac{Lm}{Gs}\right)^R} \quad (5.7)$$

**Nota:**

Se fijo en el programa el valor del **N** antes de simular la operación de la **TE**.

Se calculó **Z** con la siguiente ecuación:

$$Z = N * S \quad (5.8)$$

**Picón et al. (2007) establecieron la Ecuación para el Cálculo Simple de  $\epsilon_{TS}$ , determine la misma:**

$$\epsilon_{TS} = \frac{(T_{Linc} - T_{Lout})}{(T_{Linc} - T_{bhm})} \quad (5.9)$$

Se selecciono un valor para **Ga** entre el rango de **1,400 a 2,000  $\frac{lb}{hr ft^2}$**

Con la relacion considerada  $\frac{Lm}{Gs}$  se calculó **La**.

Se convirtieron las unidades de **Gs** a  $\frac{lb}{hr} = Gsi$  y de igual forma para **Lm** a **Lmi**

Se calculó **AF** con la siguiente ecuación:

$$A_F = \frac{Gsi}{Ga} \quad (5.10)$$

Las celdas de una **TE** son módulos de **6 x 6 ft**, el **A<sub>1C</sub> = 36 ft<sup>2</sup>**.

Se calculó **C<sub>NR</sub>** con la siguiente ecuación:

$$C_{NR} = \frac{A_F}{A_{1C}} \quad (5.11)$$

**Nota:**

Como el valor de **C<sub>NR</sub>** fue un número no entero, se corrigió al no. Entero par superior y se renombró como **C<sub>NRC</sub>**

Se calculó **A<sub>FC</sub>** con la siguiente ecuación:

$$A_{FC} = A_{1C} * C_{NRC} \quad (5.12)$$

Se propuso una combinacion de celdas (**x, y**).

Se calculó **A<sub>1CE</sub>** con la siguiente ecuación:

$$A_{1CE} = x * 6 \text{ ft} * y * 6 \text{ ft}. \quad (5.13)$$

Se calculó **N<sub>CE</sub>** con la siguiente ecuación:

$$N_{CE} = \frac{A_{FC}}{A_{1CE}} \quad (5.14)$$

**Nota:**

Como el valor de  $N_{CE}$  no fue un número entero, se tomó el siguiente número entero par superior y se renombró como  $N_{CEC}$

Se calculó  $A_{TCE}$  con la siguiente ecuación:

$$A_{TCE} = N_{CEC} * A_{1CE} \quad (5.15)$$

**Nota:**

$A_{TCE}$  debe ser  $\geq A_{FC}$ , si no lo es aumente  $x$  y/o  $y$  hasta que se cumpla la condición.

Se calculó  $L_{ac}$  y  $G_{ac}$  con las siguientes ecuaciones:

$$L_{ac} = \frac{L_{mi}}{A_{TCE}} \quad (5.16)$$

$$G_{ac} = \frac{G_{si}}{A_{TCE}} \quad (5.17)$$

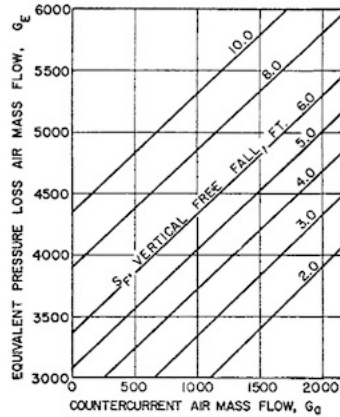
De la **Tabla 5.2** de acuerdo al tipo de empaque de la **TE**, se seleccionaron los datos de los parámetros **A'**, **n'**, **S<sub>F</sub>**, **B** y **C**:

**Tabla 5.2. Valores de A', n', S<sub>F</sub>, B y C para Diferentes Empaques de las TE.**

Deck Type	Values of A', n', B, C', and S <sub>F</sub>				
	A'	n'	S <sub>F</sub> , Ft	B	C'
				Mult. × 10 <sup>-8</sup>	Mult. × 10 <sup>-12</sup>
A	0.060	0.62	3.00	0.34	0.11
B	0.070	0.62	4.00	0.34	0.11
C	0.092	0.60	3.75	0.40	0.14
D	0.119	0.58	6.00	0.40	0.14
E	0.110	0.46	4.95	0.60	0.15
F	0.100	0.51	9.13	0.26	0.07
G	0.104	0.57	6.85	0.40	0.10
H	0.127	0.47	3.64	0.75	0.26
I	0.135	0.57	4.50	0.52	0.16
J	0.103	0.54	6.85	0.40	0.10

Used by permission: The American Institute of Chemical Engineers; Kelly, N. W. and Swenson, L. K., *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 52 © (1956) p. 263 [38]; all rights reserved.

De la **Fig. 5.3** se identificó la curva correspondiente al dato de **S<sub>F</sub>**, se determinó la **Ecuación** de la recta y se calculó **G<sub>E</sub>**.



**Fig. 5.3. Curvas  $G_E$  como funcion de  $G_{ac}$  y  $S_f$**

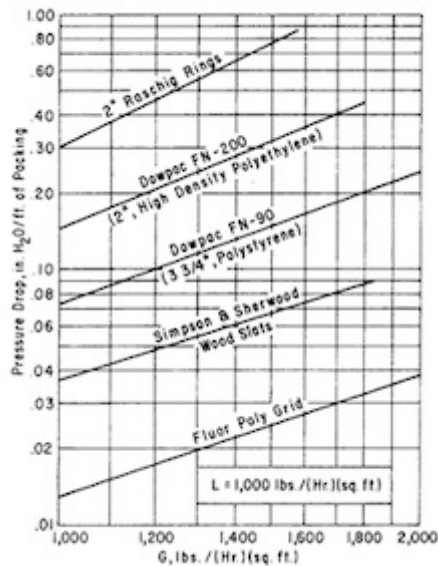
Se calculó  $dP_e$  con la siguiente ecuación:

$$dP_e = \{n'BG_{ac}^2 + n'C\sqrt{S_f}L_{ac}G_E^2\} \frac{0.0675}{\rho_{GP}} \quad (5.18)$$

Se calculó  $dP_{en}$  con la siguiente ecuación:

$$dP_{en} = \frac{dP_e}{Z} \quad (5.19)$$

De la **Fig. 5.4** se verifico que el valor de  $dP_{en}$  fuera aceptable para al menos uno de los empaques:



**Fig. 5.4.  $dP_{en}$  para diferentes tipos de empaque de la TE**

**Nota:**

Si no es aceptable, aumente  $A_{1CE}$  modificando los valores de  $x$  o  $y$ , repita los calculos a partir de la  $A_{1CE}$ .

Se considero que los louvers se instalaron en el lado mas largo de la **TE** (**x** o **y**).

Se calculó **A<sub>TL</sub>** con la siguiente ecuación:

$$A_{TL} = x \cdot N_{CEC} \cdot 2 \cdot 6 \quad (5.20)$$

Si **x > y**

Se calculó **G<sub>avi</sub>** con la siguiente ecuación:

$$G_{avi} = \frac{G_{si}}{60 \cdot \rho_{GI}} \quad (5.21)$$

Se calculó **V<sub>CL</sub>** con la siguiente ecuación:

$$V_{CL} = \frac{G_{avi}}{A_{TL}} \quad (5.22)$$

Se calculó **dP<sub>L</sub>** con la siguiente ecuación:

$$dP_L = 0.32 - \frac{0.32 - 0.02}{1600 - 400} (1600 - V_{CL}) \quad (5.23)$$

Se calculó **dP<sub>ELN</sub>** con la siguiente ecuación:

$$dP_{ELN} = 0.07 - \frac{0.07 - 0.01}{1600 - 400} (1600 - G_{ac}) \quad (5.24)$$

De la **Ecuación para el Balance de Presion**, se calculó **dP<sub>TTE</sub>**:

$$dP_{TTE} = dP_E + dP_L + dP_{ELN} \quad (5.25)$$

**Nota:**

*El valor de **dP<sub>TTE</sub>** debe estar dentro del rango de **0.75 a 1 in de H<sub>2</sub>O**, si esta fuera del rango modifique los valores de **x** y **y**, repita los calculos a partir de **A<sub>1CE</sub>** de hasta que se cumpla con la condicion.*

Se calculó **%dP<sub>E</sub>** con la siguiente ecuación:

$$\%dP_E = \frac{dP_E}{dP_{TTE}} \quad (5.26)$$

**Nota:**

***%dP<sub>E</sub>** debe estar en el rango de **70 a 80% del dP<sub>TTE</sub>**, si esta fuera de rango modifique los valores de **x** y **y**, repita los calculos a partir de **A<sub>1CE</sub>** de hasta que se cumpla con la condicion.*

Se calculó **BHP** con la siguiente ecuación:

$$BHP = \frac{G_{si} \cdot \%dP_E}{190.68 \cdot \rho_{Gs}} \quad (5.27)$$

Se calculó **BHPce** con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{BHP_{ce}} = \frac{\mathbf{BHP}}{\mathbf{N_{ce}}} \quad (5.28)$$

**Nota:**

Redondee el valor de **BHP<sub>ce</sub>** al de la potencia comercial del motor max. Superior, renómbralo como **BHP<sub>co</sub>**, motores de potencia > 75 hp no son comunes

Se calculó **BHPA<sub>TCE</sub>** con la siguiente ecuación:

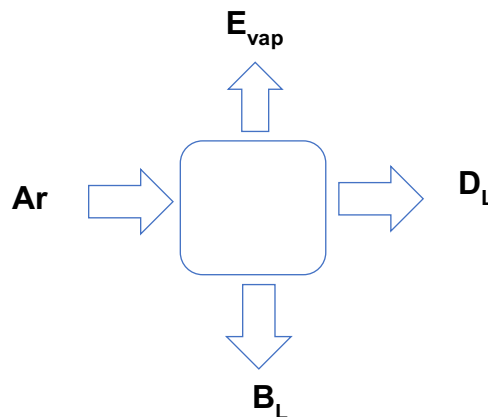
$$\mathbf{BHPA_{TCE}} = \frac{\mathbf{BHP}}{\mathbf{A_{Tce}}} \quad (5.29)$$

**Nota:**

Este valor de **BHPA<sub>TCE</sub>** debe estar en el rango de **0.05 a 0.08  $\frac{Hp}{ft^2}$** , si esta fuera del rango, ajuste **A<sub>tce</sub>** como aplique.

**Balance de Materia para el Agua**

En la **Fig. 5.5** se representa el balance de materia para el agua de la **TE**:



**Fig. 5.5. Balance de Materia para el Agua de la TE.**

Se calculó **E<sub>vap</sub>** con la siguiente ecuación

$$\mathbf{E_{vap}} = \mathbf{0.0008 * L_{vi} * Rango} \quad (5.30)$$

**Nota:**

Las unidades de: **L<sub>vi</sub> [=] gpm** y **Rango [=] F**.

Se calculó **D<sub>L</sub>** con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{D_L} = \mathbf{0.0002 * L_{vi}} \quad (5.31)$$

Se calculó **C<sub>c</sub>** y **B<sub>L</sub>** con las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{C_c} = \frac{\mathbf{CmCaCO3}}{\mathbf{CCaCO3}} \quad (5.32)$$

$$B_L = \frac{E_{vap} - (Cc-1)D_L}{Cc-1} \quad (5.33)$$

Se calculó **Ar** con la siguiente ecuación:

$$Ar = E_{vap} + D_L + B_L \quad (5.34)$$

Se calculó **G<sub>AMTE</sub>** con la siguiente ecuación:

$$G_{AMTE} = Ar_m * Hom * C_{AM} \quad (5.35)$$

Del **balance de presión** se calculó **dP<sub>TRE</sub>**:

$$dP_{TRE} = dP_{TTE} + dP_{RIC}. \quad (5.36)$$

**Nota:**

**dP<sub>TRE</sub> <= 150 kPa**, si es > ajuste lo que aplique.

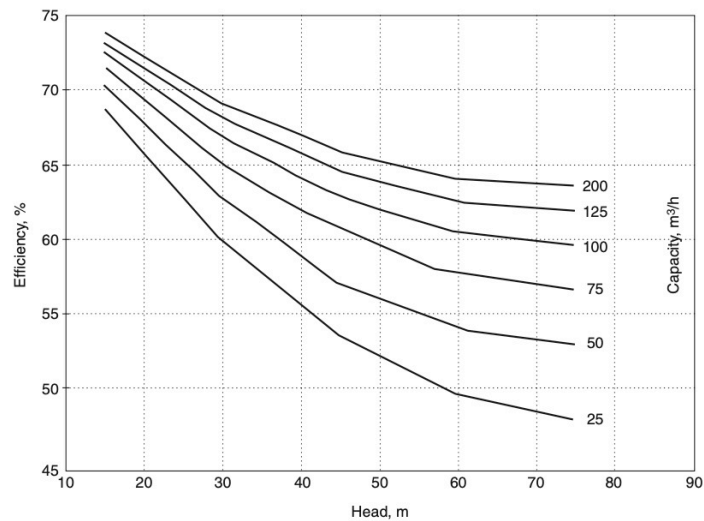
Del **balance de energía**, se despeje y calculó **W<sub>bi</sub>**:

$$W_{bi} = gr * \Delta z + \frac{dP_s - dP_{TRE}}{\rho_{lp}} \quad (5.37)$$

Se calculó **C<sub>trbi</sub>** con la siguiente ecuación:

$$C_{trbi} = \frac{-dP_s + dP_{TRE}}{\rho_{lp} * gr} + Z \quad (5.38)$$

De la **Fig. 5.6** se determino **η**:



**Fig. 5.6. Eficiencia de la Bomba a Diferentes Cabezas y Flujos del AE.**

Se calculó **Kwhpi** con la siguiente ecuación:

$$Kwhpi = \frac{-W_{bi} * L_m}{\eta_B * 1,000} \quad (5.39)$$



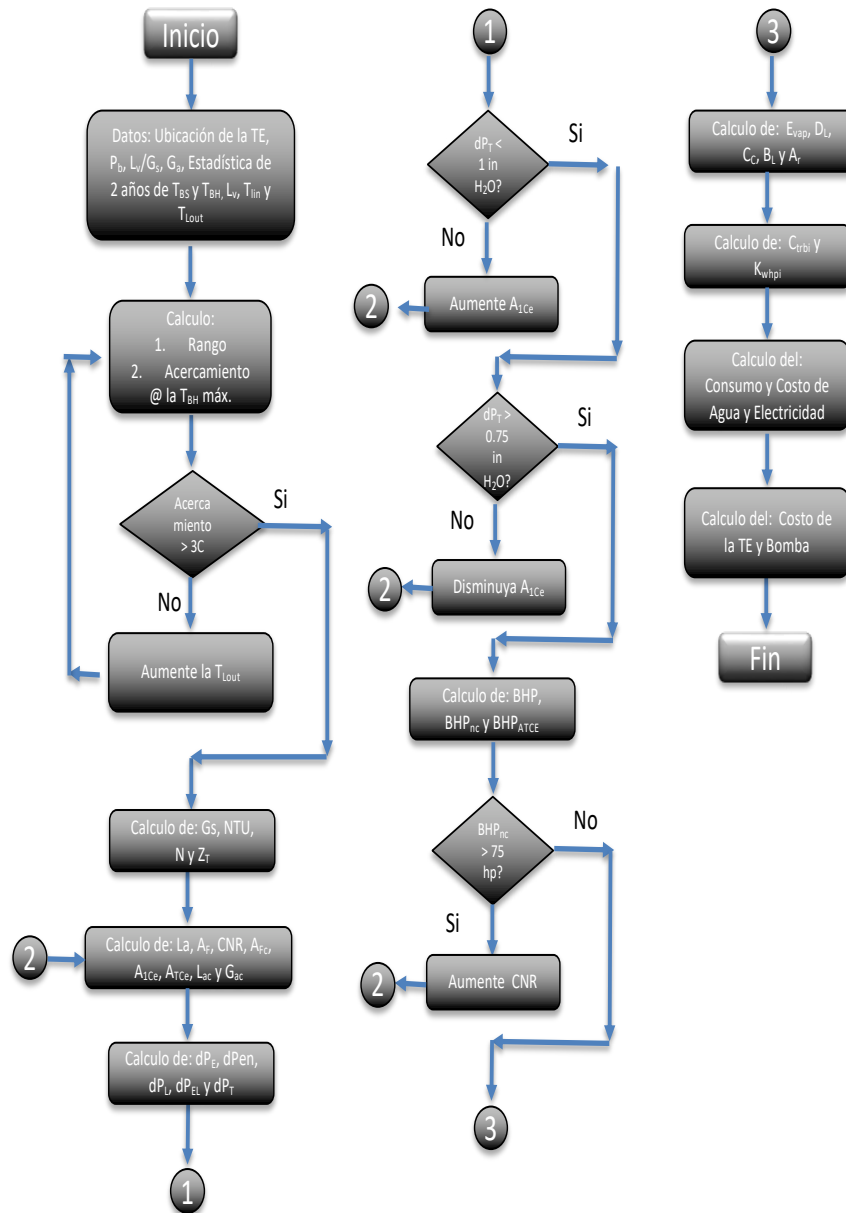
Se calculó  $C_{EMVTE}$  con la siguiente ecuación:

$$C_{EMVTE} = BHP * H_{om} \quad (5.40)$$

Se calculó  $G_{EMVTE}$  con la siguiente ecuación:

$$G_{EMVTE} = C_{EMVTE} * C_{EM} \quad (5.41)$$

La lógica para el **Diseño de una TE** se muestra en la **Fig. 5.7**:



**Fig. 5.7. Algoritmo para el Diseño de una TE**

## 5.2 Simulación de la TE

Cambie los parámetros que requiera y corra el programa del diseño y simulación de la TE, valide que los resultados sean congruentes.

La lógica para la simulación de una TE se muestra en la Fig. 5.8:

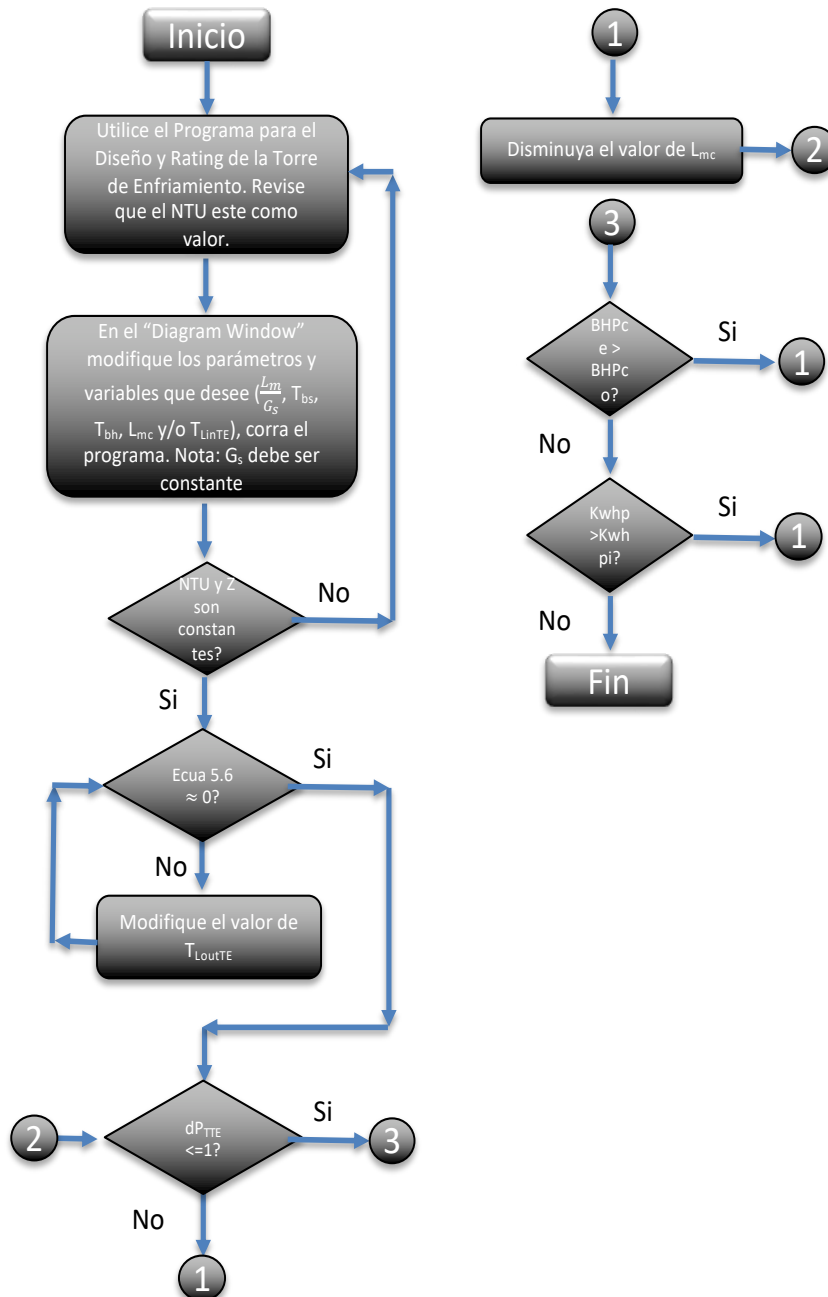


Fig. 5.8. Algoritmo para la Simulación de la operación de la TE

**Notas:**

1. Si la propuesta no cumple con los condicionales, no podrá ser llevada a cabo por la TE diseñada.
2. Gs debe permanecer constante, para que el agua se enfríe más.

La Fig. 5.9 muestra el Diagram Window de la Simulación de la TE en EES.

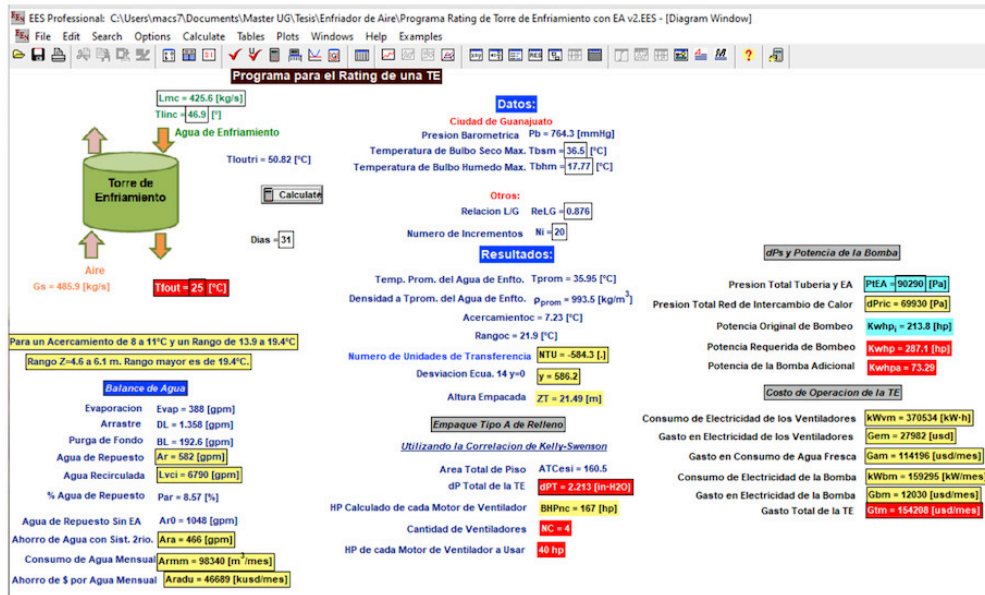


Fig. 5.9. Diagram Window de la Simulación de la TE

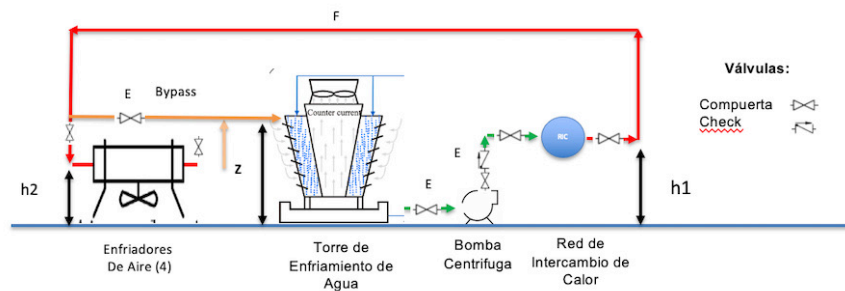
# Capítulo 6

# Capítulo 6.

## Sistemas de Enfriamiento Secundarios

### 6.1. Enfriadores de aire (EA)

Se genero el diagrama de Elevación con la ubicación de la integración y ubicación del EA, vea fig. 6.1:



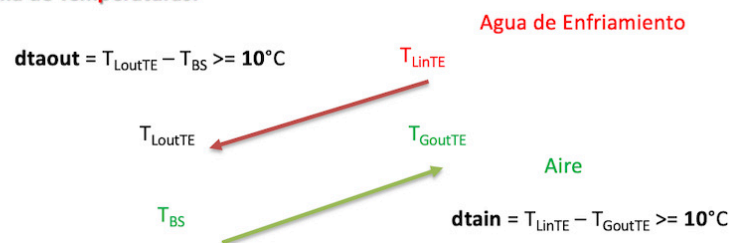
**Fig. 6.1. Diagrama en Elevación de la RE con EA.**

**Nota:**

El EA debe estar situado antes de la TE para que haga adecuadamente su función.

Se genero el diagrama de las Tp del EA para cada mes del año, se verifico que no existan cruces de T, se consideró el  $dT_{\min} \geq 10^{\circ}\text{C}$ . Vea la fig. 6.2.

**Diagrama de Temperaturas:**



**Fig. 6.2. Diagrama de Temperaturas del Agua de Enfriamiento vs. Aire**

De la Ecuación para calcular  $dt_{ain}$ , se despeje y calculó  $T_{gout}$ :

$$T_{gout} = T_{Lin} - 10 \quad (6.1)$$

Como no estaban especificados los  $\phi_i$  y  $\phi_o$  de los tubos del **EA** se supusieron, se consideraron los más pequeños comercialmente, vea **Tabla 6.1**:

**Tabla 6.1. Diámetros externos y espesores de las tuberías de acero comerciales.**

Outside diameter (mm)		Wall thickness (mm)			
16	1.2	1.6	2.0	—	—
20	—	1.6	2.0	2.6	—
25	—	1.6	2.0	2.6	3.2
30	—	1.6	2.0	2.6	3.2
38	—	—	2.0	2.6	3.2
50	—	—	2.0	2.6	3.2

**Sinnott (2005) definió los sigs. cálculos para el diseño de IC de tubos y coraza:**

De la **Ecuación del Balance de Energía**, se calculó  $Q_{EA}$ :

$$Q_{EA} = L_m * C_{pLP} * (T_{Lin} - T_{Lout}) \quad (6.2)$$

De [16] se reviso que modelo de **EA** cuya  $Q_{EAF}$  fuera cercana a  $Q_{EA}$  o fuera el múltiplo menor cercano a un entero de  $C_{EA}$ .

Se calculó  $C_{EA}$  con la siguiente ecuación:

$$C_{EA} = \frac{Q_{EA}}{Q_{EAF}} \quad (6.3)$$

**Nota:**

Si  $C_{EA} \neq$  no. Entero, considere el no. Entero inmediatamente mayor y renómbrelo como  $C_{EAC}$

Se calculó  $Q_{EAC}$ , con la siguiente ecuación:

$$Q_{EAC} = Q_{EA} * C_{EAC} \quad (6.4)$$

Se calculó  $\Delta T_{ML}$  con la siguiente ecuación:

$$\Delta T_{ML} = \frac{T_{Lin} + T_{Lout} - T_{gout} - T_{BS}}{\ln \frac{T_{Lin} - T_{gout}}{T_{Lout} - T_{BS}}} \quad (6.5)$$

Se calculó **R** con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{T_{Lin} - T_{Lout}}{T_{gout} - T_{BS}} \quad (6.6)$$

Se calculó **S** con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{T_{gout} - T_{BS}}{T_{Lin} - T_{BS}} \quad (6.7)$$

Se calculó **Ft** con la siguiente ecuación:

$$F_t = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \ln \left[ \frac{(1 - S)}{(1 - RS)} \right]}{(R - 1) \ln \left[ \frac{2 - S[R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)}]}{2 - S[R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)}]} \right]} \quad (6.8)$$

Se calculó  $\Delta T_M$  con la siguiente ecuación:

$$\Delta T_M = \Delta T_{ML} * F_t \quad (6.9)$$

**Cálculos del Lado Agua de Enfriamiento.**

De la **Tabla 6.2** se seleccionó la **Ui** más adecuada para el proceso en cuestión:

**Tabla 6.2. Coeficientes Globales Comunes de Transferencia de Calor**

Shell and tube exchangers		
Hot fluid	Cold fluid	<i>U</i> (W/m <sup>2</sup> °C)
Air-cooled exchangers		
Process fluid		
Water		300-450
Light organics		300-700
Heavy organics		50-150
Gases, 5-10 bar		50-100
10-30 bar		100-300
Condensing hydrocarbons		300-600

De la **Ecuación General de la Transferencia de Calor**, se despejo y calculó **Ac**:

$$A_c = \frac{Q_{EAC}}{U_{i*} \Delta T_M} \quad (6.10)$$

De la **Ecuación para calcular la Densidad**, se despejo y calculó **G<sub>EA</sub>**:

$$G_{EA} = \rho_{gEA} * V_{am} \quad (6.11)$$

De la **Ecuación para calcular el Volumen de un Cilindro Recto**, se despejó y calculó  $L_s$ :

$$L_s = \frac{4 * V_s}{\pi * \phi_{im}^2} \quad (6.12)$$

**Nota:** las dims de  $\phi_{im} = \phi_i$  y  $\phi_{om} = \phi_o$  deben ser [m]

De la **Ecuación para calcular el Área Externa de un Cilindro Recto**, se calculó la misma:

$$A_{es} = \pi * \phi_{om} * L_s \quad (6.13)$$

Se calculó  $A_{et}$  con la siguiente ecuación:

$$A_{et} = A_{es} * C_{EA} \quad (6.14)$$

De la **Ecuación para calcular el Área de un Círculo**, se calculó la misma:

$$A_{fs} = \frac{\pi * \phi_{im}^2}{4} \quad (6.15)$$

Se considero  $u_{it} = 1.5 \frac{m}{s}$ , rango recomendado 1.5 a 2.5.

Se calculó  $L_v EA$  con la siguiente ecuación:

$$L_v EA = \frac{L_v}{C_{EA}} \quad (6.16)$$

Se calculó  $A_{fst}$  con la siguiente ecuación:

$$A_{fst} = \frac{L_v EA}{u_{it}} \quad (6.17)$$

Se calculó  $N_{SEA}$  con la siguiente ecuación:

$$N_{SEA} = \frac{A_{fst}}{A_{fs}} \quad (6.18)$$

Se calculó  $N_{rc}$  con la siguiente ecuación:

$$N_{rc} = \frac{N_{SEA}}{N_v} \quad (6.19)$$



**Nota:**

Si  $N_{rc} \neq$  no. Entero, considere  $N_{RCC} =$  Entero y nómbrelo como  $N_{rc}$

Se calculó  $L_{tp}$  con la siguiente ecuación:

$$L_{tp} = \frac{Ls}{N_v} \quad (6.20)$$

Se calculó  $A_p$  con la siguiente ecuación:

$$A_p = \frac{2 * L_{EA}}{N_v} \quad (6.21)$$

Se calculó  $N_{RS}$  con la siguiente ecuación:

$$N_{RS} = \frac{N_v}{N_{PR}} \quad (6.22)$$

Se calculó  $R_{TP}$  con la siguiente ecuación:

$$R_{TP} = N_{RCC} * N_{RS} \quad (6.23)$$

Se calculó  $A_{fla}$  con la siguiente ecuación:

$$A_{fla} = H_{EA} * 2 * (L_{EA} - R_{tp} * \phi_{om}) \quad (6.24)$$

De la Ecuación para calcular  $Re_t$ , se calculó el mismo:

$$Re_t = \frac{\rho_{LP} * u_{it} * \phi_{im}}{\mu_{LP}} \quad (6.25)$$

De la Ecuación para calcular  $Pr_t$  ( $Re > 2,100$ ), se calculó el mismo:

$$Pr_t = \frac{1000 * C_{PLP} * \mu_{LP}}{k_{LP}} \quad (6.26)$$

De la **Tabla 6.3** se determinaron los valores para  $h_{ic}$ ,  $R_{fc}$ ,  $h_{if}$  y  $R_{ff}$  más adecuados para los fluidos en cuestión:

**Tabla 6.3. Coeficientes Locales de Transferencia de Calor y Factores de Ensuciamiento para diferentes fluidos**

Fluid	Coefficient (W/m <sup>2</sup> °C)	Factor (resistance) (m <sup>2</sup> °C/W)
River water	3000–12,000	0.0003–0.0001
Sea water	1000–3000	0.001–0.0003
Cooling water (towers)	3000–6000	0.0003–0.00017
Towns water (soft)	3000–5000	0.0003–0.0002
Towns water (hard)	1000–2000	0.001–0.0005
Steam condensate	1500–5000	0.00067–0.0002
Steam (oil free)	4000–10,000	0.0025–0.0001
Steam (oil traces)	2000–5000	0.0005–0.0002
Refrigerated brine	3000–5000	0.0003–0.0002
Air and industrial gases	5000–10,000	0.0002–0.0001
Flue gases	2000–5000	0.0005–0.0002
Organic vapours	5000	0.0002
Organic liquids	5000	0.0002
Light hydrocarbons	5000	0.0002
Heavy hydrocarbons	2000	0.0005
Boiling organics	2500	0.0004
Condensing organics	5000	0.0002
Heat transfer fluids	5000	0.0002
Aqueous salt solutions	3000–5000	0.0003–0.0002

Se calculó  $t_w$  con la siguiente ecuación:

$$t_w = \frac{U_i(T_{gp}-T_{LP})}{h_{ic}} + T_{LP} \quad (6.27)$$

Se calculó la relación  $\frac{\mu_c}{\mu_{tw}}$

De la **Tabla 6.4** se determinaron los valores para **C y b**.

**Tabla 6.4. Valores de C y b para diferentes fluidos y procesos**

$$\begin{aligned} C &= 0.021 \text{ for gases,} \\ &= 0.023 \text{ for non-viscous liquids,} \\ &= 0.027 \text{ for viscous liquids.} \end{aligned}$$

$$b = 0.3 \text{ para enfriamiento y } 0.4 \text{ para calentamiento.}$$

De la **Ecuación para calcular  $Nu_t$** , se calculó el mismo:

$$Nu_t = C * Re_t^{0.8} * Pr_t^b * \frac{\mu_c}{\mu_{tw}}^{0.14} \quad (6.28)$$

De la **Ecuación para calcular  $h_i$** , se calculó el mismo:

$$h_i = \frac{Nu_t * k_c}{d_e} \quad (6.29)$$

**Nota:** Para los tubos  $d_e = d_{im}$

De la **Tabla 6.5** se determino el valor de  **$R_t$** .

**Tabla 6.5. Rugosidad para Tuberías de Diferentes Materiales de Construcción.**

Material	Absolute roughness, mm
Drawn tubing	0.0015
Commercial steel pipe	0.046
Cast iron pipe	0.26
Concrete pipe	0.3 to 3.0

De la **Ecuación para calcular  $j_f$** , se calculó el mismo:

$$j_f = \frac{R_f}{\rho_c \cdot u_f^2} \quad (6.30)$$

De la **Ecuación para calcular  $dP_{ss}$** , se calculó la misma:

$$dP_{ss} = N_{pt} \left\{ 8j_f \frac{A_p \mu_c^{-m}}{d_{im} \mu_{tw}} + 2.5 \right\} \frac{\rho_c \cdot u_f^2}{2} \quad (6.31)$$

**Notas:**

1.  $m = 0.14$  para  $Re > 2,100$
2.  $dP_{ss} < 100 \text{ kPa}$  para que el diseño sea aceptable, si es  $> 100 \text{ kPa}$  vaya al punto 6.1.3 y aumente  $\phi_i$  y  $\phi_o$ , repita los cálculos hasta que se cumpla la condición.

**Cálculos del Lado Aire.**

**Ma et al. (2017) definieron los sigs. Cálculos para el lado aire de un IC tipo serpentín de flujo cruzado.**

Se calculó  $V_f$  con la siguiente ecuación:

$$V_f = \frac{V_{am}}{A_{fla}} \quad (6.32)$$

Se calculó  $V_{nf}$  con la siguiente ecuación:

$$V_{nf} = V_f * \frac{273}{273 + T_a} \quad (6.33)$$

De la **Ecuación para calcular  $h_a$** , se calculó el mismo:

$$h_a = 218.9 * V_{nf}^2 \quad (6.34)$$

Se calculó  $G_a$  con la siguiente ecuación:

$$G_a = V_{nf} * \rho_a \quad (6.35)$$

Se calculó  $G_{max}$  con la siguiente ecuación:

$$G_{max} = 2 * G_a \quad (6.36)$$

De la **Ecuación para calcular  $dP_a$** , se calculó la misma:

$$dP_a = 9.8 * f_f^{*N_v} * \frac{G_{max}^2}{2 * \rho_a} \quad (6.37)$$

De la **Ecuación para calcular  $P_{fcT}$** , se calculó la misma:

$$P_{fcT} = \frac{dP_a * V_{am}}{\eta_v} \quad (6.38)$$

**Nota:**

*Este valor debe ser similar al de la ficha técnica del EA, si no lo es revise y corrija los datos y cálculos hasta que se cumpla tal condición.*

De la **Ecuación para calcular  $U_o$** , se calculó el mismo:

$$U_o = \left[ \frac{1}{h_a} + \frac{1}{h_i} + \frac{d_{om} \ln \frac{d_o}{d_i}}{k_w} + \frac{d_o}{d_i} * \left( \frac{1}{h_{ic}} + \frac{1}{h_{if}} \right) \right]^{-1} \quad (6.39)$$

Se calculó  $dU$  con la siguiente ecuación:

$$dU = \frac{U_o - U_i}{U_o} * 100 \quad (6.40)$$

**Nota:**

*Si  $dU < 30\%$ , el diseño es aceptado. Si  $dU > 30\%$  considere  $U_o = U_i$  y repita los cálculos hasta que se cumpla la condición.*

**Consumo de Servicios.**

Se calculó  $C_{me}$  con la siguiente ecuación:

$$C_{me} = Q_{EAFkw} * H_{om} \quad (6.41)$$

Se calculó  $G_{em}$  con la siguiente ecuación:

$$G_{em} = C_{em} * C_{em} \quad (6.42)$$

### Costo del Proyecto y Payback.

Se calculó  $C_T$  con la siguiente ecuación:

$$C_T = C_{UEA} * C_{eAC} \quad (6.43)$$

Se calculó  $C_{TI}$  con la siguiente ecuación:

$$C_{EIEA} = C_{EI} * C_{eAC} \quad (6.44)$$

Se calculó  $C_{ETP}$  con la siguiente ecuación:

$$C_{ETP} = C_T + C_{EIEA} \quad (6.45)$$

Se calculó el **Payback** con la siguiente ecuación:

$$\text{Payback} = \frac{C_{ETP}}{C_a} \quad (6.46)$$

### Caídas de Presión en Tuberías, Accesorios y Válvulas

De la **Tabla 6.5** se determino  $R_T$ .

Se calculó  $R_r$  con la siguiente ecuación:

$$R_r = \frac{R_T}{d_{int}} \quad (6.47)$$

De la **Ecuación para calcular el Área de un Círculo**, se calculó la misma:

$$A_f = \frac{\pi d_{im}^2}{4} \quad (6.48)$$

De la **Ecuación para calcular el Flujo en una Tubería**, se despejo y determino  $u_t$ :

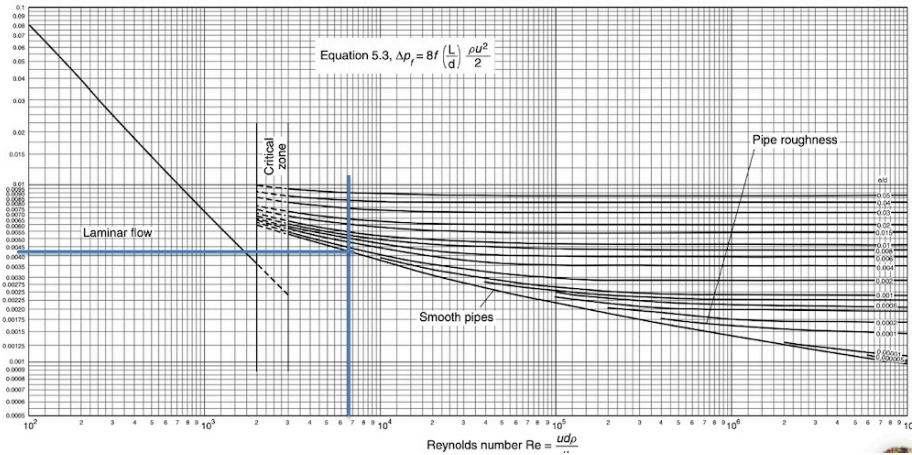
$$u_t = \frac{L_{vea}}{A_f} \quad (6.49)$$

**Nota:**  $u_t$  máx. Recomendada =  $1.5 \frac{m}{s}$

De la Ecuación para calcular  $Re_t$ , se calculó el mismo:

$$Re_t = \frac{\rho_{LP} \cdot u_{it} \cdot \phi_{im}}{\mu_{LP}} \quad (6.50)$$

De la fig. 6.3 se determinó f:

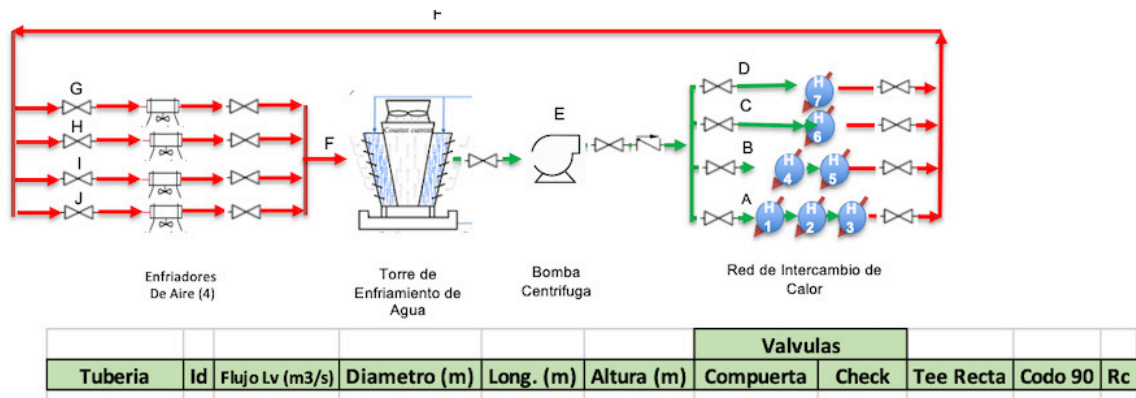


**Fig. 6.3. Factor de Fricción para Tuberías vs. no. De Reynolds y  $R_t$**

De la Ecuación para calcular  $dP_t$ , se calculó la misma:

$$dP_t = 8 f \frac{L_t}{d_{im}} \frac{\rho_{tp} \cdot u_t^2}{2} \quad (6.51)$$

Se genero el diagrama en elevación de la integración de(los) EA(s) requeridos con tuberías, válvulas y accesorios, vea fig. 6.4:



**Fig. 6.4. Diagrama en Elevación de la RE con EA, tuberías, válvulas y accesorios.**

Se contabilizo la cantidad de los tipos de válvulas y accesorios.

De la **Tabla 6.6** se determinaron los valores de  **$k_v$ ,  $k_{rc}$ ,  $k_{c90}$ , etc.** para cada tipo de válvula y accesorio:

**Tabla 6.6. Número de Cabezas de Velocidad para Accesorios y Válvulas**

Fitting or valve	$K$ , number of velocity heads
45° standard elbow	0.35
45° long radius elbow	0.2
90° standard radius elbow	0.6–0.8
90° standard long elbow	0.45
90° square elbow	1.5
Tee-entry from leg	1.2
Tee-entry into leg	1.8
Union and coupling	0.04
Sharp reduction (tank outlet)	0.5
Sudden expansion (tank inlet)	1.0
Gate valve	
fully open	0.15
1/4 open	16
1/2 open	4
3/4 open	1
Globe valve, bevel seat-	
fully open	6
1/2 open	8.5
Plug valve - open	0.4

Se calculó  **$N_{cv}$**  con la siguiente ecuación:

$$N_{cv} = N_{va} * K_v + N_{rc} * K_{rc} + \dots \quad (6.52)$$

Se calculó  **$C_v$**  con la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{u_f^2}{2 * g_r} \quad (6.53)$$

Se calculó  **$P_c$**  con la siguiente ecuación:

$$P_c = N_{cv} * C_v * \rho_c * g_r \quad (6.54)$$

De la **Ecuación del Balance de Presión**, se determinó  **$dP_{Tuss}$** :

$$dP_{Tuss} = P_c + dP_t \quad (6.55)$$

### Cálculo de $K_{whpa}$ .

Del **balance de presión** se calculó  **$dP_{TREEA}$** :

$$dP_{TREEA} = dP_{TRE} + dP_{TUSS} \quad (6.56)$$

**Nota:**

*Es recomendable que  $dP_{TREEA} \leq 150 \text{ kPa}$ , si no lo es evalúe lo que implica y decida.*

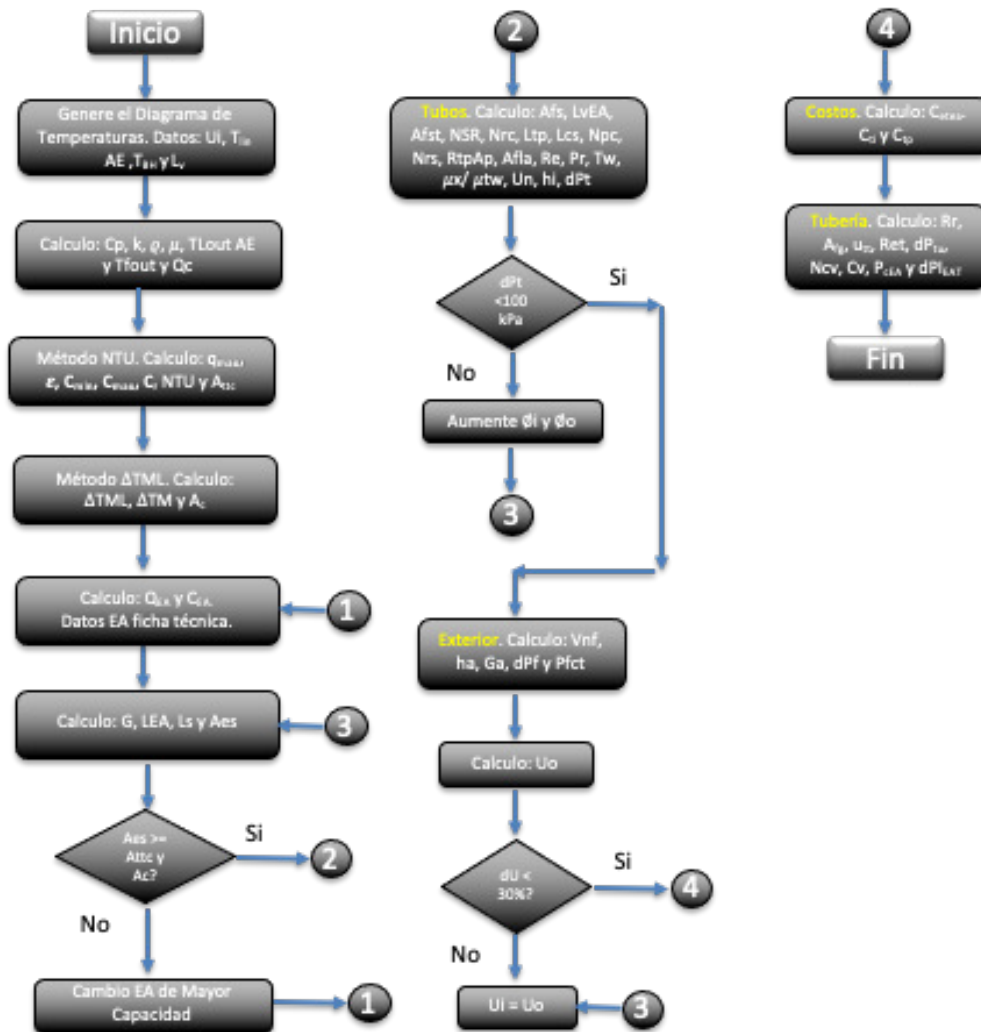
Para el cálculo de  $Kw_{hpi}$  se procedió de acuerdo con las ecuaciones 5.37 a la 5.39.

Se calculó  $Kw_{hpa}$  con la siguiente ecuación:

$$Kw_{hpa} = Kw_{hp} - Kw_{hpi} \quad (6.57)$$



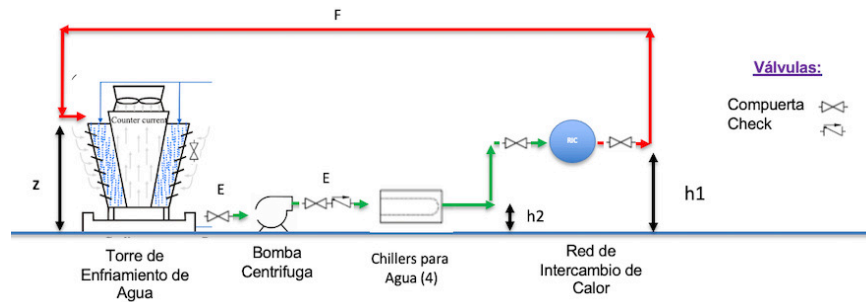
La **fig. 6.5.** muestra la logica para el calculo y simulacion de la operacion de un **EA**:



**Fig. 6.5. Algoritmo de la Lógica para el Diseño y Simulación de un EA**

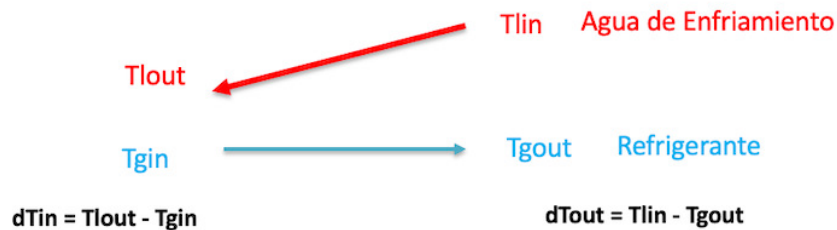
## 6.2. Chillers para agua (CA)

Se genero el diagrama en elevación con la ubicación de la integración del(os) **CA(s)**, vea **fig. 6.6**. El **Chiller** debe ubicarse después de la **TE**, para suministrar agua de enfriamiento más fría a la **RIC**, como consecuencia la  $T_{Loutric}$  será menor.



**Fig. 6.6. Diagrama en Elevación de la RE con el CA**

Se genero el diagrama de las **Tp** del **Chiller** para cada mes del año para identificar cruces de T, se consideró  $dT_{min} \geq 10^{\circ}C$ . Vea la **fig. 6.7**.



**Fig. 6.7. Diagrama de Temperaturas del Agua de Enfriamiento vs. Refrigerante**

De la **Ecuación** para **calcular**  $dT_{out}$ , se despejo y calculó  $T_{gout}$ :

$$T_{gout} = T_{Lin} - 10 \quad (6.58)$$

De la **Ecuación** para **calcular**  $dT_{in}$ , se despejo y calculó  $T_{Lout}$ :

$$T_{Lout} = T_{gin} - 10 \quad (6.59)$$

Como no se tenían los datos de los  $\phi_i$  y  $\phi_o$  de los tubos de los Intercambiadores de Calor del **Chiller** se supusieron, considerando los más pequeños comercialmente, vea la **Tabla 6.1**.

De la **Ecuación del Balance de Energía**, se calculó  $Q_I$ :

$$Q_I = L_m * C_{pLP} * (T_{Lin} - T_{Lout}) \quad (6.60)$$

De [17] se reviso que modelo de **CA** cuya  $Q_{CN}$  se asemejaba a  $Q_I$  y que fuera el múltiplo menor entero de  $C_E$ .

Se calculó  $C_E$  con la siguiente ecuación:

$$C_E = \frac{Q_I}{Q_{CN}} \quad (6.61)$$

**Nota:**

Como  $C_E \neq no. Entero$ , se consideró  $C_{EC} = no. Entero$  inmediatamente mayor a  $C_E$ .

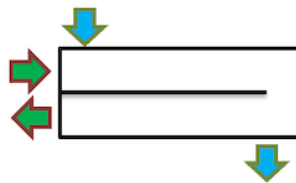
Se calculó  $Q_{IC}$  con la siguiente ecuación:

$$Q_{IC} = Q_{CN} * C_{EC} \quad (6.62)$$

**Evaporadores del Chiller**

**Cálculos del Lado Tubos.**

Estos evaporadores son **IC** de tubos y coraza.  $N_{pc}=1$  y  $N_{pt}=2$ , tubos de cobre. Vea **fig. 6.8**:



**Fig. 6.8. Diagrama de Flujo del Evaporador del Chiller**

Se generaron los diagramas de  $T_p$  de los **evaporadores** para cada mes del año para identificar cruces, se consideró  $dT_{min} \geq 10^\circ C$ . Vea la **fig. 6.7**.

De [17] se identificó el **refrigerante** y  $R_c$  de cada evaporador, de [18] la  $P_{ev}$ .

Se calculó  $Q_{IE1}$  con la siguiente ecuación:

$$Q_{IE1} = Q_{IC} * \frac{Rc1}{Rc1+Rc2} \quad (6.63)$$

De la **Ecuación del Calor Latente de Vaporización**, se despejo y calculó  $R_{TF1}$ :

$$R_{TF1} = \frac{Q_{IE1}}{\Delta H_{vr}} \quad (6.64)$$

De la **Ecuación para calcular el Área de un Círculo**, se determino la misma:

$$A_{f1t} = \frac{\pi * \phi_{im}^2}{4} \quad (6.65)$$

Se calculó  $\Delta T_{ML}$  con la ecuación **6.5**.

De la **Tabla 6.2** se seleccionó la **U<sub>i</sub>** más adecuada para el proceso.

De la **Ecuación General de la Transferencia de Calor**, se despejo y calculo **Ac**:

$$A_{c1} = \frac{Q_{IE1}}{U_{i*} \Delta T_{ML}} \quad (6.66)$$

De la **Ecuación del Área Externa de un Cilindro Recto**, se determino la misma:

$$A_{e1t} = \pi * \phi_{om} * L_t \quad (6.67)$$

Se calculó **N<sub>tp</sub>** con la siguiente ecuación:

$$N_{pt} = \frac{A_{c1}}{A_{e1t*} N_{pt}} \quad (6.68)$$

Se calculó **A<sub>fp</sub>** con la siguiente ecuación:

$$A_{fp} = N_{tp} * A_{f1t} \quad (6.69)$$

Se calculó **u<sub>t</sub>** con la siguiente ecuación:

$$u_t = \frac{L_m}{\rho_{lp*} A_{fp}} * \frac{Rc1}{Rc1+Rc2} \quad (6.70)$$

**Nota:** Por economía el fluido de flujo mayor se ubicó en los tubos.

Se calculó **Re<sub>t</sub>** con la ecuación **6.25**.

Se calculó **Re<sub>t</sub>** con la ecuación **6.26**.

De la **Tabla 6.2** se seleccionaron los valores más apropiados para **h<sub>ic</sub>**, **R<sub>fc</sub>**, **h<sub>if</sub>** y **R<sub>ff</sub>**.

Se calculó **t<sub>w</sub>** con la ecuación **6.27**.

Se calculó la relación  $\frac{\mu_c}{\mu_{tw}}$

Se determino de la **Tabla 6.4** los valores para **C**, **a**, **b** y **c**.

Se calculó **Nu<sub>T</sub>** con la ecuación **6.28**.

Se calculó  $h_i$  con la ecuación **6.29**.

**Nota:** Para los tubos  $d_e = d_{im}$

De la **Tabla 6.1.5**. se determinó el valor de  $R_t$ .

Se calculó  $j_f$  con la ecuación **6.30**.

Se calculó  $dP_{TSS}$  con la ecuación **6.27**.

**Notas:**

1.  $m = 0.14$  para  $Re > 2,100$
2.  $dP_{TSS} < 100 \text{ kPa}$  para que el diseño sea aceptable, si es  $> 100 \text{ kPa}$  aumente  $\phi_i$  y  $\phi_o$  y repita los cálculos hasta que se cumpla la condición.

**Cálculos para el Lado Coraza.**

Como no se tenía el dato del Pitch de los tubos, se propuso uno. De la **Tabla 6.8** se obtuvieron los valores de  $K_1$  y  $n_1$ . De la **Ecuación para Pit** se calculó la misma:

$$Pit = 1.25 * \phi_o \tag{6.71}$$

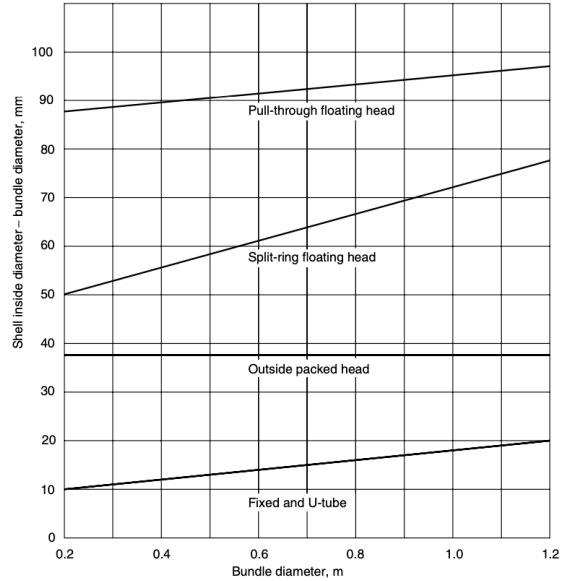
**Tabla 6.8. Valor de  $K_1$  y  $n_1$  de acuerdo con el Arreglo de Pitch y Numero de Pasos del IC**

Triangular pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
$K_1$	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
$n_1$	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675
Square pitch, $p_t = 1.25d_o$					
No. passes	1	2	4	6	8
$K_1$	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
$n_1$	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643

De la **Ecuación para calcular  $Db$** , se calculó el mismo:

$$Db = \phi_o \left\{ \frac{Nt}{K_1} \right\}^{\frac{1}{n_1}} \tag{6.72}$$

Como no se tenía el dato del tipo de cabezal del **IC**, se supuso y se determinó **CI** de la **Fig. 6.9**:



**Fig. 6.9. Diámetro Interior de la Coraza vs. diámetro del Has de Tubos.**

Se calculó **Ds** con la siguiente ecuación:

$$D_s = D_b + C_l \quad (6.73)$$

Se calculó **Lb** con la siguiente ecuación:

$$L_b = \frac{D_s}{5} \quad (6.74)$$

Se calculó **As** con la siguiente ecuación:

$$A_s = \frac{(P_{it} - \phi_o) D_s \cdot L_b}{P_{it}} \quad (6.75)$$

Se calculó **Ga** con la siguiente ecuación:

$$G_a = \frac{R_{tf}}{A_s} \quad (6.76)$$

Se calculó **us** con la siguiente ecuación:

$$u_s = \frac{G_a}{\rho_f} \quad (6.77)$$

**Nota:**

El rango recomendado para **us** es de **10 a 30  $\frac{m}{s}$** , si **us** es mayor o menor, modifique el tipo de **Pitch (Tabla 6.8)** y repita los pasos hasta que se cumpla con la condición.

De la **Ecuación para calcular **d<sub>e</sub>****, se determino el mismo:

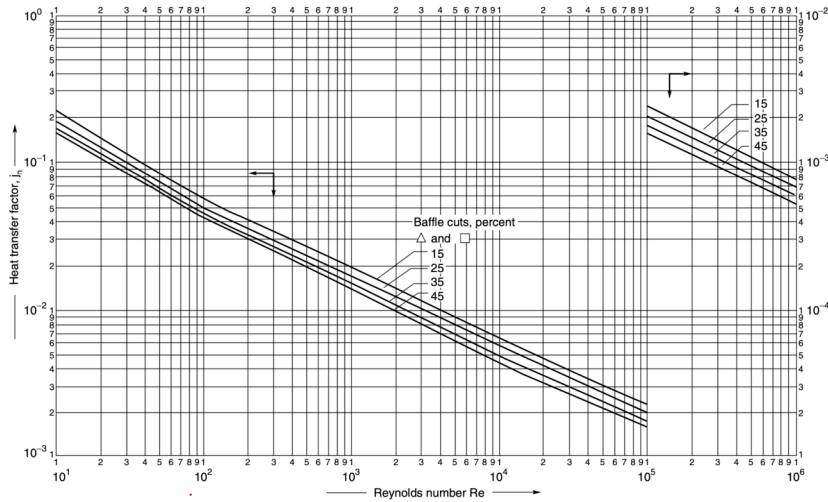
$$d_e = \frac{1.27}{\phi_o} \{P_{it}^2 - 0.785 \phi_o^2\} \quad (6.78)$$

De la Ecuación para calcular  $Re_c$ , se determino el mismo:

$$Re_c = \frac{Ga * d_e}{\mu_f} \quad (6.79)$$

Como no se tenía el valor de  $C_B$  se supuso.

De la Fig. 6.10. se determinó  $j_h$ .



**Fig. 6.10. Factor de Transferencia de Calor vs. Re y Corte de Baffle**

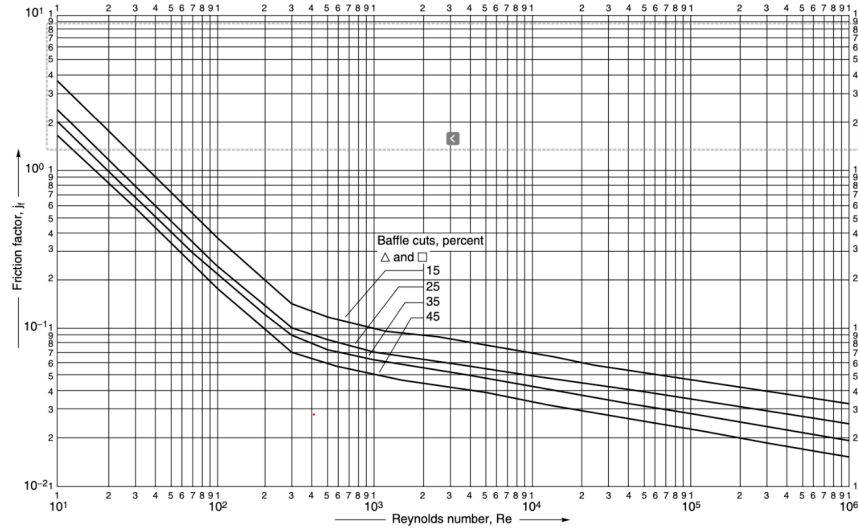
De la Ecuación para calcular  $Pr_c$ , se determino el mismo:

$$Pr_c = \frac{Cp_f * \mu_f}{k_f} \quad (6.80)$$

De la Ecuación para calcular  $h_c$ , se determino el mismo:

$$h_c = \frac{k_f * j_h * Re_c * Pr_c^{0.33} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}}{d_e} \quad (6.81)$$

De la Fig. 6.11 se determino  $j_f$ :



**Fig. 6.11. Factor de Fricción vs. Re y Corte de Baffle**

De la **Ecuación para calcular  $dP_c$** , se determino la misma:

$$dP_c = 8j_f \left(\frac{D_s}{d_e}\right) \left(\frac{L_t}{l_b}\right) \left(\frac{\rho_f u_s^2}{2}\right) \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad (6.82)$$

**Nota:**

El valor máx.  $dP_c$  para gases a presión es de **82 kPa**, si es mayor cambie el tipo de cabezal que tenga un **CI** mayor.

Se calculó  $U_o$  con la **ecuación 6.39**.

Se calculó  $dU$  con la **ecuación 6.40**.

**Nota:**

Si  $dU < 30\%$ , el diseño es aceptado. Si  $dU > 30\%$  iguale  $U_o = U_i$  y repita los cálculos hasta que se cumpla la condición.

Para el cálculo del **Evaporador 2** se repitieron los cálculos del **Evaporador 1**.

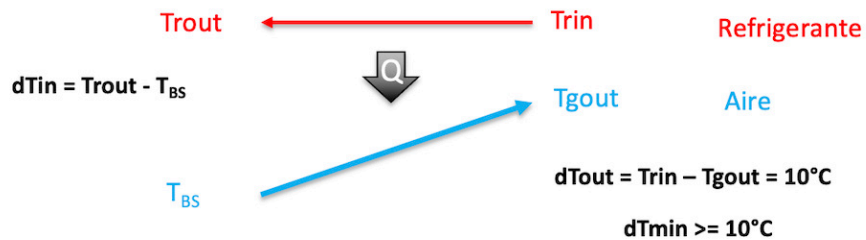


### Condensador.

Posee una batería de serpentines enfriados por aire a flujo cruzado.

### Cálculos para los Serpentines.

Se genero el diagrama de **T<sub>p</sub>** para cada mes del año para identificar cruces de las **T**, se consideró el **dT<sub>min</sub> >= 10°C**. Vea la **fig. 6.12**. Se tomo el dato para **P<sub>co</sub>** de [3]



**Fig. 6.12. Diagrama de Temperaturas del Condensador del Chiller**

Se calculó **T<sub>gout</sub>**, despejándola de la **Ecuación del Balance de Energía**:

$$T_{gout} = T_{BS} + \frac{Q_{CN}}{c_{p_g} * G_s} \quad (6.83)$$

De la **Ecuación para calcular dt<sub>min</sub>**, se despejo y calculó **T<sub>rin</sub>**:

$$T_{rin} = 10 + T_{gout} \quad (6.84)$$

De la **Ecuación del Calor Latente de Condensación**, se despejo y calculó **R<sub>tf</sub>**:

$$R_{tf} = \frac{Q_{CN}}{\Delta H_c} \quad (6.85)$$

Se calculó **ΔT<sub>ML</sub>** con la ecuacion **6.5**.

Se calculó **L<sub>t</sub>**, con la siguiente ecuación:

$$L_t = C_s * L_s \quad (6.86)$$

Como no se tenían los datos de los **φ<sub>i</sub>** y **φ<sub>o</sub>** de los tubos de los serpentines del **Condensador** se supusieron, considerando los más pequeños comercialmente. Vea la **Tabla 6.1**.

De la **Ecuación para calcular el Área Externa de un Cilindro Recto**, se calculó  $A_{et}$ :

$$A_{et} = \pi * \phi_{om} * Lt \quad (6.87)$$

Se calculó  $R_{tfs}$  con la siguiente ecuación:

$$R_{tfs} = \frac{R_{tf}}{c_s} \quad (6.88)$$

De la **Ecuación de calcular la Densidad**, se despeje y calculó  $L_{rs}$ :

$$L_{rs} = \frac{R_{tfs}}{\rho_f} \quad (6.89)$$

Se calculó  $A_{f1t}$  con la ecuación 6.65.

De la **Ecuación para calcular el Flujo**, se despeje y calculó  $u_{rt}$ :

$$u_{rt} = \frac{L_{rs}}{A_{f1t}} \quad (6.90)$$

**Nota:**

*El rango de  $u_{rt}$  recomendado en los tubos es de  $1$  a  $4 \frac{m}{s}$ , si esta fuera de rango, modifique el diámetro del serpentín y repita los cálculos hasta que la condición se cumpla.*

Se calculó  $Re_t$  con la ecuación 6.25.

Se calculó  $Pr_t$  con la ecuación 6.26.

Se calculó  $A_{sc}$  con la siguiente ecuación:

$$A_{sc} = \frac{L_s}{N_{rs}} \quad (6.91)$$

De la **Tabla 6.2** se determinó  $h_{ic}$ ,  $R_{fc}$ ,  $h_{if}$  y  $R_{ff}$ .

Se calculó  $t_w$  con la ecuación 6.27.

Se calculó la relación:  $\mu = \frac{\mu_c}{\mu_{tw}}$

De la **Tabla 6.1** se seleccionó  $U_i$ .

De la **Ecuación para calcular  $\Gamma h$** , se determino el mismo:

$$\Gamma h = \frac{R_{tf}}{L_t} \quad (6.92)$$

De la **Ecuación para calcular  $h_i$** , se determinó el mismo:

$$h_i = 0.95 \text{ kf} \left[ \frac{\rho_f(\rho_f - \rho_{G1})g_r}{\mu_f \Gamma_h} \right] \quad (6.93)$$

De la **Tabla 6.3** se determinó el valor de **R<sub>t</sub>**.

Se calculó **j<sub>f</sub>** con la ecuación **6.30**.

De la **Ecuación para calcular  $dP_t$** , se determinó la misma:

$$dP_t = N_{pt} \left\{ 8j_f \frac{A_{sc} \mu_c^{-m}}{d_{im} \mu_{tw}} + 2.5 \right\} \frac{\rho_f w_t^2}{2} \quad (6.94)$$

**Notas:**

1.  $m = 0.14$  para  $Re > 2,100$
2.  $dP_t < 100 \text{ kPa}$  para que el diseño sea aceptable, si es  $> 100 \text{ kPa}$  aumente  $\phi_i$  y  $\phi_o$  y repita los cálculos hasta que se cumpla la condición.

**Cálculos para el Lado Aire.**

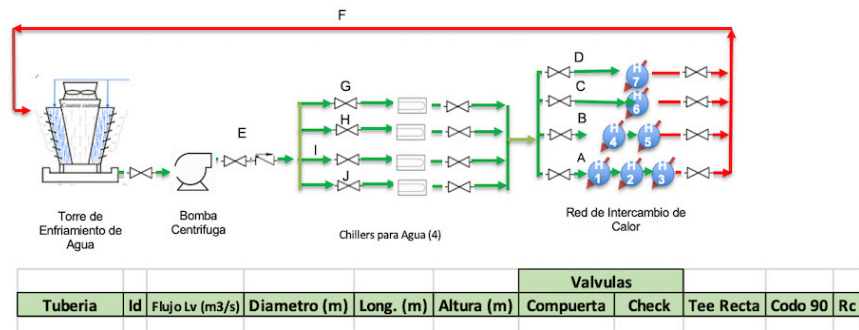
Se realizaron los cálculos de acuerdo con las **Ecuación 6.32** a la **6.38**.

Se calcularon **U<sub>o</sub>** y **dU** de acuerdo con las **Ecuación 6.39** a la **6.40**.

Se calculó **Consumo de Servicios** de acuerdo con las **Ecuación 6.41** a la **6.42**.

Se calculó el **Costo del Proyecto y Payback** de acuerdo con las **Ecuación 6.43** a la **6.46**.

Se genero el **Diagrama de flujo de la RE con la integración del(os) CA(s) con tuberías, válvulas y accesorios**. Vea **Fig. 6.13**.



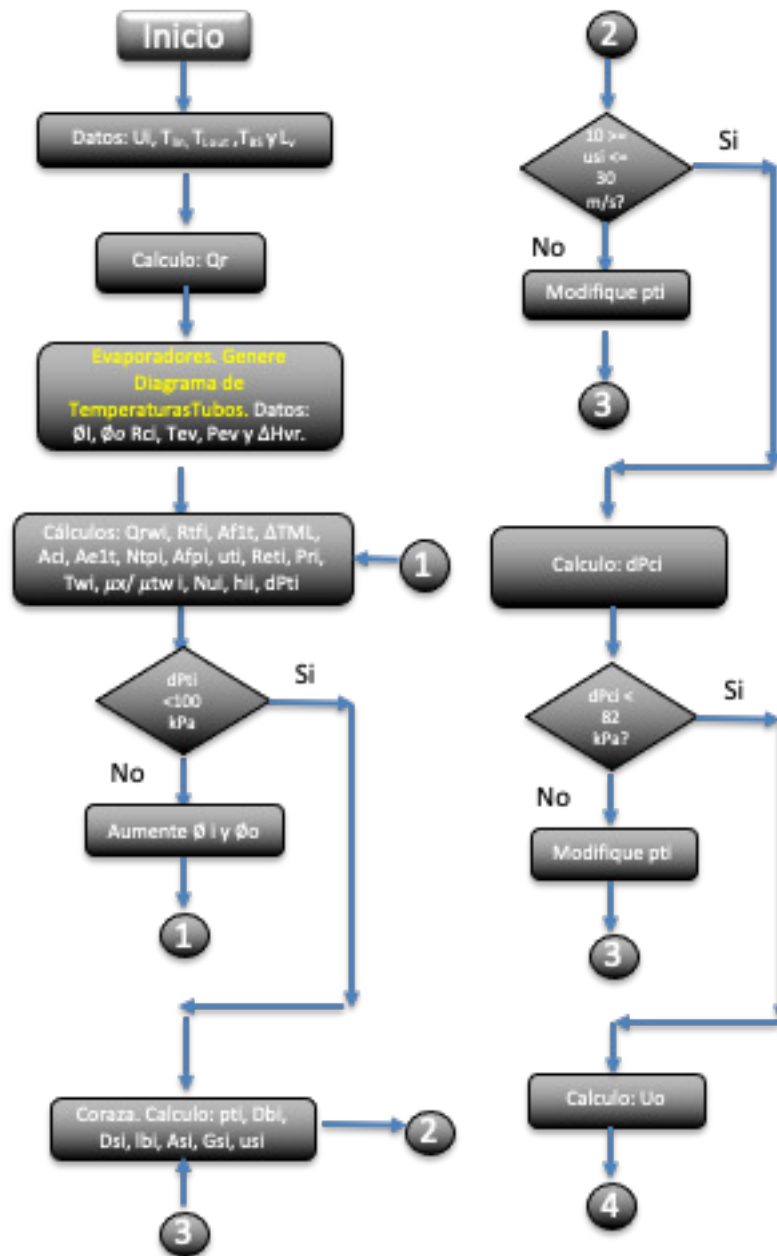
**Fig. 6.13. Diagrama de Flujo de la RE con CA, válvulas y tuberías.**

Se contabilizaron la long. De la tubería de interconexión del(os) **CA(s)**, así como la cantidad de los tipos de válvulas y accesorios.

Se calculó **dP<sub>Tuss</sub>** de acuerdo con las **Ecuación 6.47** a la **55**.

Se calculó **Kw<sub>hpa</sub>** de acuerdo con las **Ecuación 6.56** a la **57**.

La **fig. 6.14.** muestra la logica para el calculo y simulacion de la operacion de un **CA**:



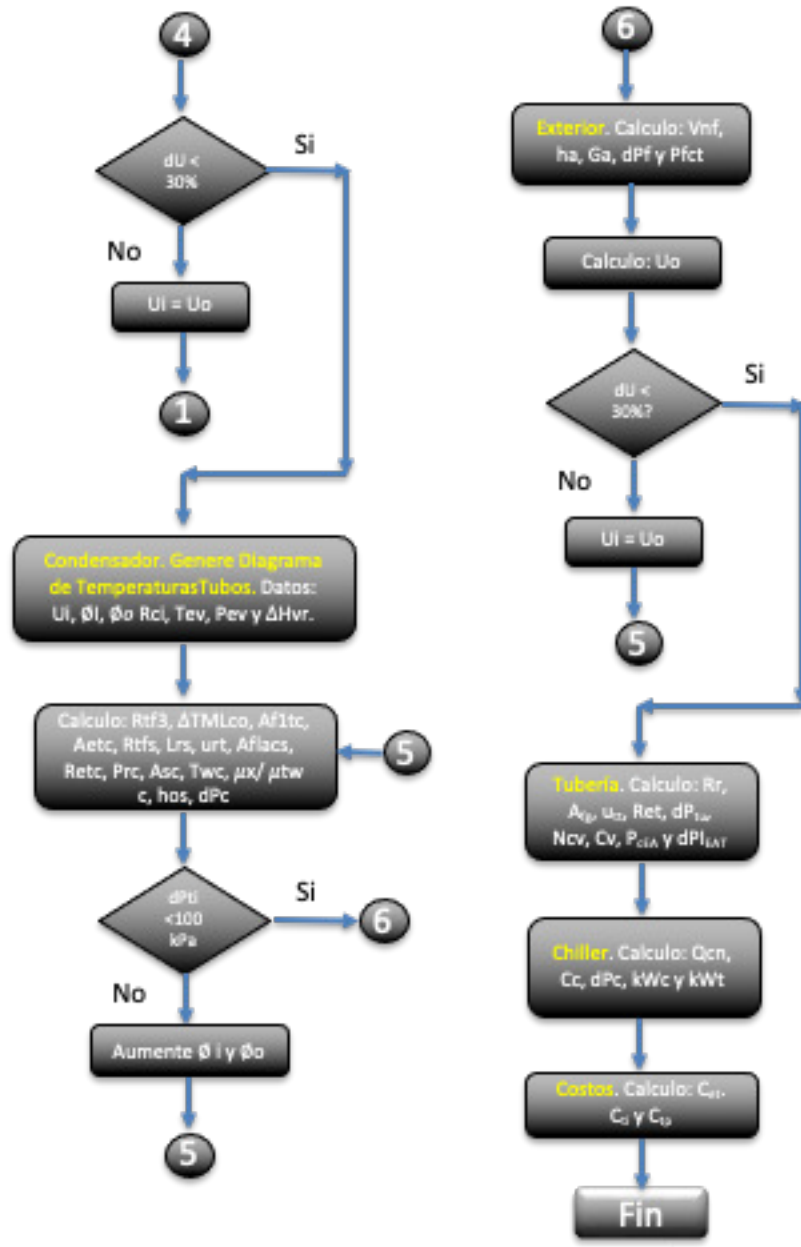


Fig. 6.14. Algoritmo de la Lógica para el Diseño y Simulación de un CA

# Capítulo 7

# Capitulo 7.

## Distribucion de flujo en redes de enfriamiento (DFRE)

Una **RE** es un sistema cuyo objetivo es disminuir la temperatura de corrientes calientes para adecuarlas al requerimiento de un proceso industrial.

Los componentes de una **RE** son:

- a) Sistema de Enfriamiento (**SE**) que puede ser Torre de enfriamiento, Chiller, Enfriador de Aire, etc. Puede ser un tipo de equipo o la combinacion entre ellos.
- b) Bomba de recirculacion del **SE**.
- c) Red de intercambio de calor que pueden ser intercambiadores de calor, equipo enchaquetado, etc. Los cuales pueden estar instalados en serie o en paralelo.
- d) Sistema de flujo el cual incluye tuberias y valvulas.
- e) Sus componentes pueden estar instalados a distintas alturas.

La problemática detectada de las **RE** es:

- a) Operan fuera de su capacidad de diseño con temperaturas del agua de enfriamiento  $> 50^{\circ}\text{C}$  y no isotermicas entre sus ramales, velocidades de los fluidos fuera del rango recomendado.
- b) Mal diseñadas.
- c) Cambios de sus condiciones de operación o ambientales, sin un analisis previo de su capacidad de diseño.
- d) Ensuciamiento o incrustacion de los equipos y tuberias.

En este capitulo se presenta el modelo termo hidraulico para determinar la **DFRE**, ya que en ocasiones se aumenta la carga termica de la **RE** debido a necesidades del proceso; al aumentar el flujo el mismo se redistribuye en la **RE** de acuerdo a las caidas de presion de los diferentes ramales, en algunos casos se favorece en otros no, si la velocidad del fluido baja por debajo de la minima recomendada y el fluido posee sales origina la precipitacion de las mismas en las tuberias o equipos.

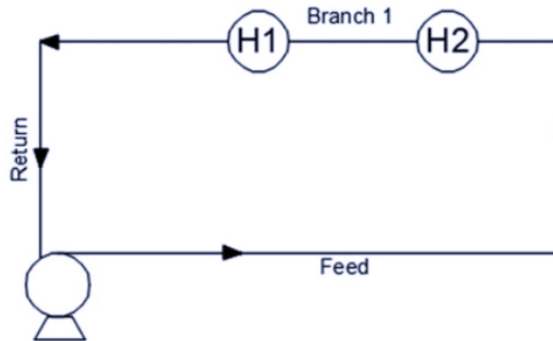
Los calculos implican los balances de materia, energia y depositacion de ensuciamiento.

*Lugo & Picón (2020) Desarrollaron el modelo del desempeño termo hidraulico de **RE** sujetas a ensuciamiento, la cual se reproduce en esta Tesis.*

La **dP** debida a la **friccion de una tuberia** puede ser determinada de acuerdo con la siguiente Ecuación:

$$dP = KL_v^2 \quad (7.1)$$

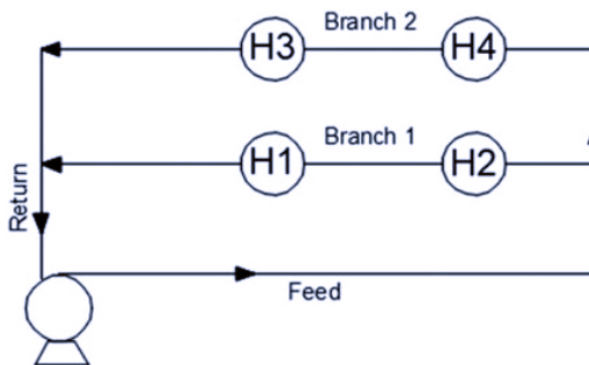
Para el caso de una **RIC** con arreglo en serie (**Fig. 7.1**) el **Lv** a través de cada **IC** es igual, la **dP RIC** es la sumatoria de la **dP** de cada **IC** y se puede expresar como:



**Fig. 7.1 Arreglo en Serie de una RIC**

$$dP_{RIC} = \sum_{i=1}^n K_i L_v^2 \quad (7.2)$$

Para el caso de una **RIC** con **arreglo en paralelo**, la **dP** de cada ramal es igual pero el **Lv** es diferente (**Fig. 7.2**); por lo tanto, el **Lv total** es igual al **Lv** de cada ramal, arreglando la **Ecuación 7.2**:



**Fig. 7.2 Arreglo en Paralelo de una RIC**



$$L_{vT} = L_{v1} + L_{v2} = \sqrt{\frac{dP}{K_{B1}}} + \sqrt{\frac{dP}{K_{B2}}} \quad (7.3)$$

Combinando las **Ecuación 7.1 y 7.3**:

$$K_{1+2} = \frac{dP}{L_v^2} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{K_{B1}}\right)^{0.5} + \left(\frac{1}{K_{B2}}\right)^{0.5}\right]^2} \quad (7.4)$$

El **Lv total** en los 2 ramales es:

$$L_{v\ 1+2} = \sqrt{\frac{dP}{K_{1+2}}} \quad (7.5)$$

El **Lv del ramal 1** y la **fracción del Lv total** es:

$$L_{v\ 1} = \sqrt{\frac{dP}{K_{B1}}} \quad (7.6)$$

$$\frac{L_{v\ 1}}{L_{v\ 1+2}} = \sqrt{\frac{K_{1+2}}{K_{B1}}} \quad (7.7)$$

### **Resistencia al flujo a través de tuberías y accesorios.**

La **dP** a través una tubería recta se puede calcular con la siguiente Ecuación:

$$dP = \frac{32 L_t}{\pi^2 \phi_i^5} \rho f L_v^2 \quad (7.8)$$

Con las **Ecuación 7.1 y 7.9** la expresión para calcular **K<sub>t</sub>** es:

$$K_t = \frac{32 L_t}{\pi^2 \phi_i^5} \rho f. \quad (7.9)$$

La Ecuación para calcular **f** para tuberías ligeramente corroídas es:

$$f = 0.007 + \frac{0.528}{Re^{0.42}} \quad (7.10)$$

Para válvulas y accesorios **K<sub>fitting</sub>** se puede expresar como:

$$K_{fitting} = \frac{8 \rho}{\pi^2 \phi_i^4} k_f \quad (7.11)$$

Los valores de **k<sub>f</sub>** se encuentran en tablas.

$K_t$  para todo el sistema puede ser calculada con:

$$K_t = \sum K_{fitting} + \sum K_t + \sum K_{IC} \quad (7.12)$$

$K_{IC}$  se puede calcular usando la **Ecuación 7.1**.

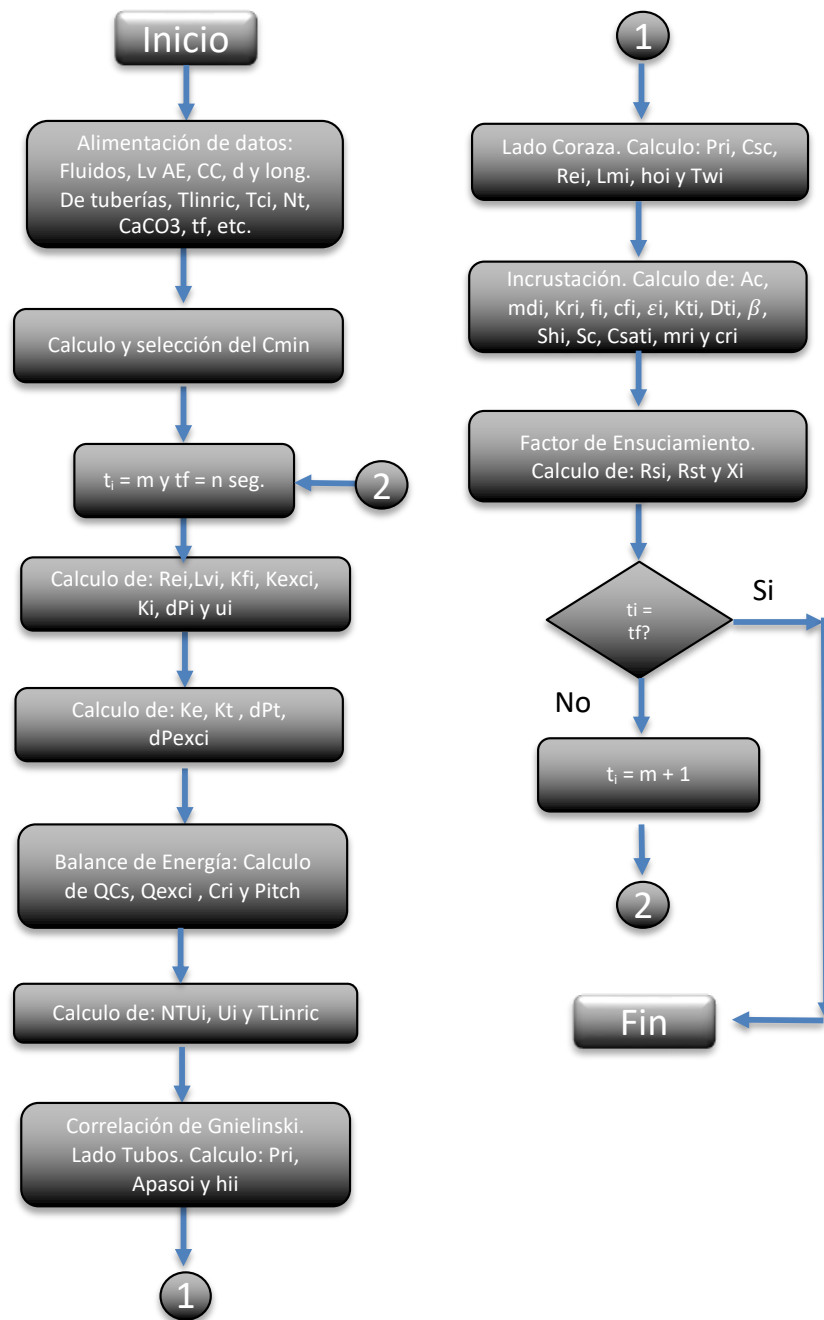
La  $dP_{IC}$  se puede calcular con:

$$dP = \frac{32 f L t N_p^2}{\pi^2 \phi_i^5 N_t^2} L_v^2 \quad (7.13)$$

Bajo condiciones de ensuciamiento  $\phi_t$  libre se reduce vs.  $t$  ya que la capa de incrustación crece.

Con la **Ecuación 4.13** se calcula  $X_f$ .

La logica general para el diseño y programacion de la DFRE se muestra en la Fig. 7.3:



**Fig. 7.3. Algoritmo para el diseño de una DFRE**

# Capítulo 8

# Capítulo 8.

## Diseño y costeo de Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

Sinnott (2005) Desarrollo la metodología para el diseño y costeo de IC.

Symister (2016) Compilo tres métodos para el costeo de IC.

Se recolectaron los datos de proceso: fluidos,  $m_H$ ,  $T_{Hin}$ ,  $T_{Hout}$  y  $T_{Lin}$ .

Se genero el diagrama de T de las  $C_c$  y  $C_H$  para identificar cruces de T y que los  $dT_{min} \geq 10^\circ C$ .

Se determino con el EES:  $C_{p_c}$ ,  $\rho_c$ ,  $k_c$ ,  $\mu_c$ ,  $C_{p_H}$ ,  $\rho_H$ ,  $k_H$  y  $\mu_H$ .

Se determino el material de construcción adecuado para el IC.

Se calculó  $Q_c$  con la **Ecuación De transferencia de calor:**

$$Q_c = m_c C_{p_c} \Delta T_c \quad (8.1)$$

De acuerdo con el **balance de energía**  $Q_c = Q_f$ , se calculó  $L_m$  despejándola de la **Ecuación De transferencia de calor:**

$$L_m = \frac{Q_f}{C_{p_c} \Delta T_c} \quad (8.2)$$

Se calculó  $\Delta T_{ML}$  con la Ecuación 6.5.

Se selecciono de la **Tabla 6.7** la  $U_i$  más adecuada para el proceso en cuestión.

Se calculó  $A_c$  con la **Ecuación 6.66.**

Se calculó  $A_{e1t}$  con la **Ecuación 6.67.**

Se calculó  $N_{tp}$  con la **Ecuación 6.68.**

Se calculó  $A_{fp}$  con la **Ecuación 6.69.**

Se calculó  $u_t$  con la **Ecuación 6.70.**

**Nota:** Por economía el fluido de flujo mayor se ubicó en los tubos.

Se calculó  $Re_t$  con la **Ecuación 6.25.**

Se calculó  $Pr_t$  con la **Ecuación 6.26.**

Se seleccionaron  $h_{ic}$ ,  $R_{fc}$ ,  $h_{if}$  y  $R_{ff}$  de la **Tabla 6.2**

Se calculó  $t_w$  con la **Ecuación 6.27.**

Se calculó  $\frac{\mu_c}{\mu_{tw}}$ .

Se seleccionaron **C, a, b y c** de la **Tabla 6.4.**

Se calculó  $Nu_t$  con la **Ecuación 6.28**.

Se calculó  $h_i$  con la **Ecuación 6.29**.

**Nota:** Para los tubos  $d_e = d_{im}$

Se selecciono  $R_t$  de la **Tabla 6.5**.

Se calculó  $j_f$  con la **Ecuación 6.30**.

Se calculó  $dP_t$  con la **Ecuación 6.31**.

**Notas:**

1.  $m = 0.14$  para  $Re > 2,100$

2.  $dP_T < 100 \text{ kPa}$  para que el diseño sea aceptable, si es  $> 100 \text{ kPa}$  aumente  $\phi_i$  y  $\phi_o$  y recalculé desde la  $A_{e1t}$  a la  $dP_t$  hasta que se cumpla la condición.

### **Cálculos Lado Coraza.**

Como no se tenía el dato del Pitch de los tubos, se propuso uno. De la **Tabla 6.8** se obtuvieron los valores de  $K_1$  y  $n_1$ . Se calculó  $Pit$  en la **Ecuación 6.71**:

Se calculó  $Db$  con la **Ecuación 6.72**.

Como no se tenía el dato del tipo de cabezal del **IC**, se supuso y se determinó **CI** de la **Fig. 6.9**.

Se calculó  $Ds$  con la **Ecuación 6.73**.

Se calculó  $Lb$  con la **Ecuación 6.74**.

Se calculó  $As$  con la **Ecuación 6.75**.

Se calculó  $Ga$  con la **Ecuación 6.76**.

Se calculó  $u_s$  con la **Ecuación 6.77**.

**Nota:**

*El rango recomendado para  $u_s$  es de  $10$  a  $30 \frac{m}{s}$ , si  $u_s$  es mayor o menor, modifique el tipo de **Pitch** (**Tabla 6.8**) y repita los pasos hasta que se cumpla con la condición.*

Se calculó  $d_e$  con la **Ecuación 6.78**.

Se calculó  $RE_c$  con la **Ecuación 6.79**.

Como no se tenía el dato de  $C_B$  se supuso.

Se determino  $j_h$  de la **Fig. 6.10**.

Se calculó  $Pr_c$  con la **Ecuación 6.80**.

Se calculó  $h_c$  con la **Ecuación 6.81**.

Se determino  $j_f$  de la **Fig. 6.11**.

Se calculó  $dP_c$  con la **Ecuación 6.82**.

**Nota:**

El valor máx.  $dP_c$  para gases a presión es de **82 kPa**, si es mayor cambie el tipo de cabezal que tenga un **CI** mayor.

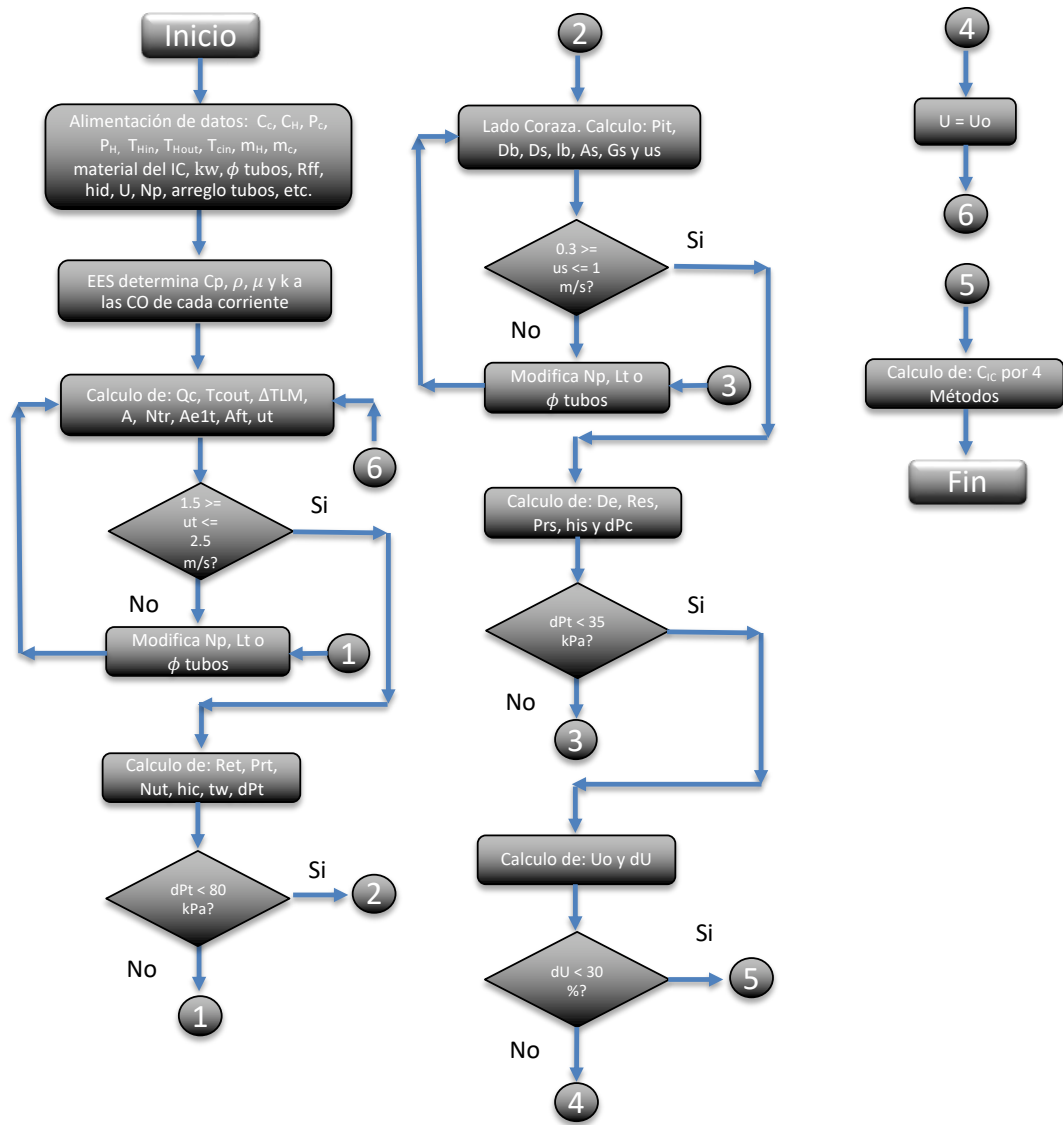
Se calculó **U<sub>o</sub>** con la **Ecuación 6.39**.

Se calculó **dU** con la **Ecuación 6.40**.

**Nota:**

Si **dU < 30%**, el diseño es aceptado. Si **dU > 30%** iguale **U<sub>o</sub> = U<sub>i</sub>** y repita los cálculos a partir de la **A<sub>c</sub>** hasta que se cumpla la condición.

La lógica general para el diseño y programación de un IC de tubos y coraza se muestra en la **fig. 8.1**.



**Fig. 8.1. Algoritmo para el diseño y costeo de un IC.**



# Capítulo 9

# Capítulo 9.

## Casos de estudio

### Caso de estudio 1.

Una RE que consta de una TE y una RIC con 7 IC con arreglo serie-paralelo, se encuentra trabajando fuera de condiciones de operación aceptables ya que las  $T_{\text{Lout IC-2, 3, 4 y 5}}$  son  $> 50^{\circ}\text{C}$  lo cual promueve la generación y depositación de ensuciamiento, la  $T_{\text{LoutRIC}} = 47.7^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{Lmáx}} = 50^{\circ}\text{C}$ ) y la  $dP_{\text{RIC}} = 65 \text{ kPa}$  (Max. 150 kPa). Vea Fig. 9.1.

Todos los IC son de tubos y coraza.

La RE está instalada en la cd. De Guanajuato, Gto.

La concentración de  $\text{CaCO}_3$  en el agua fresca es de  $0.23 \text{ g/L}$

$$\text{El } L_v = 0.2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$\text{pH} = 9$

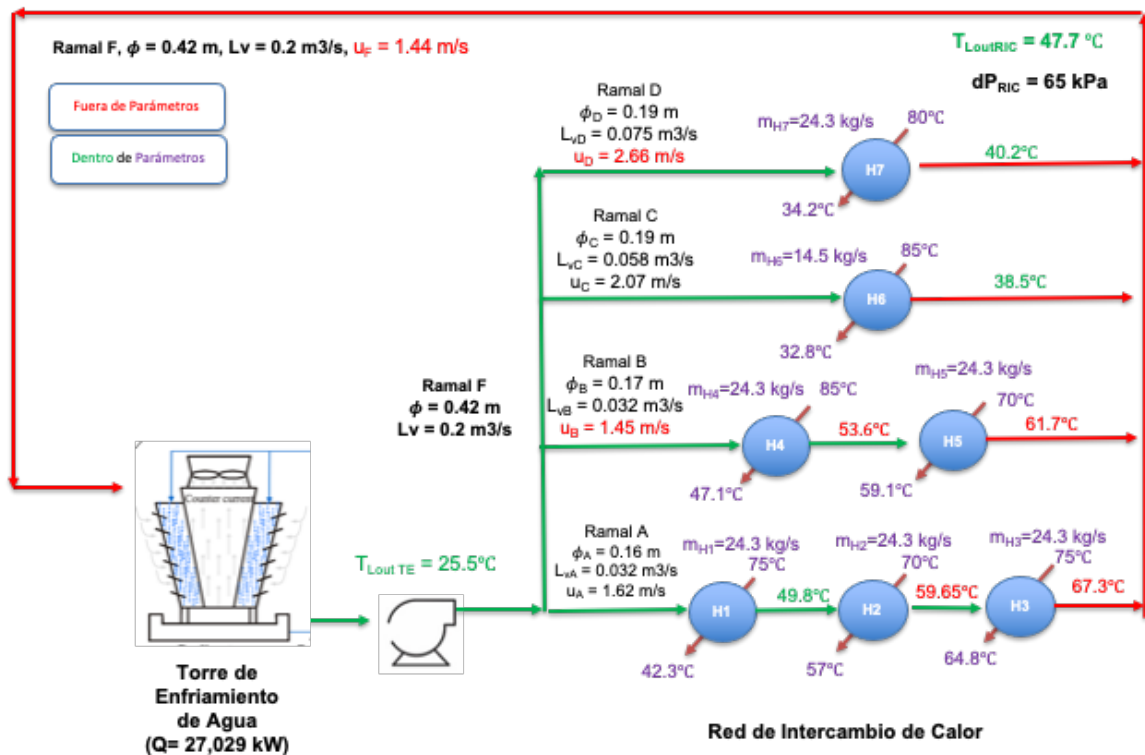


Fig. 9.1. Diagrama de Flujo de la RE con IC en arreglo serie-paralelo. Caso de Estudio 1

La **Tabla 9.1.** posee la información de las tuberías del **RE** con sus características.

**Tabla 9.1. Tuberías de la RE del Caso de Estudio 1 con sus Características.**

Tubería	Diametro (m)	Longitud (m)	Elevación (m)
E y F	0.42	160	0
A	0.16	26	3
B	0.17	14	3
C	0.19	20	3
D	0.19	8	3

La **Tabla 9.2** posee la información termo hidráulica del diseño de los **IC** de la **RIC**.

**Tabla 9.2. Información Termo-hidráulica de los IC de la RIC del Caso de Estudio 1**

	IC1	IC2	IC3	IC4	IC5	IC6	IC7
No. de Tubos (Nt)	240	48	24	180	24	360	360
Pit (m)	0.03125	0.0525	0.0625	0.0375	0.0625	0.025	0.03125
Arreglo de los Tubos	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular
No. Pasos por Tubos	6	12	8	6	8	6	6
mH (kg/s)	24.31	24.31	24.31	24.31	24.31	14.58	24.31
T <sub>Lin</sub> (°C)	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8
T <sub>Hi</sub> (°C)	75	70	85	85	70	85	85
Lt (m)	6.18	4.83	6.18	6.18	7.32	6.18	7.32
Q <sub>i</sub> (m)	0.0218	0.046	0.046	0.0268	0.046	0.0176	0.0218
Ds (m)	0.731	0.749	0.546	0.748	0.566	0.689	0.849
dP Tubos (kPa)	35.11	44.13	42.35	39.91	39.82	37.47	32.08
Q (kW)	3320	1319	1032	3848	1104	3181	4652
Nt / Lv	1293	259	129	970	129	1940	1940
Lv (m <sup>3</sup> /s)	0.03333	0.01328	0.01043	0.03879	0.01112	0.03195	0.04668
Q <sub>t</sub> (m)	0.168	0.106	0.094	0.181	0.097	0.165	0.199
Lv	0.18558	m <sup>3</sup> /s					
ut diseño	1.5	m/s					

Se programo y diseño de la TE en el software EES, vea Fig. 9.2:

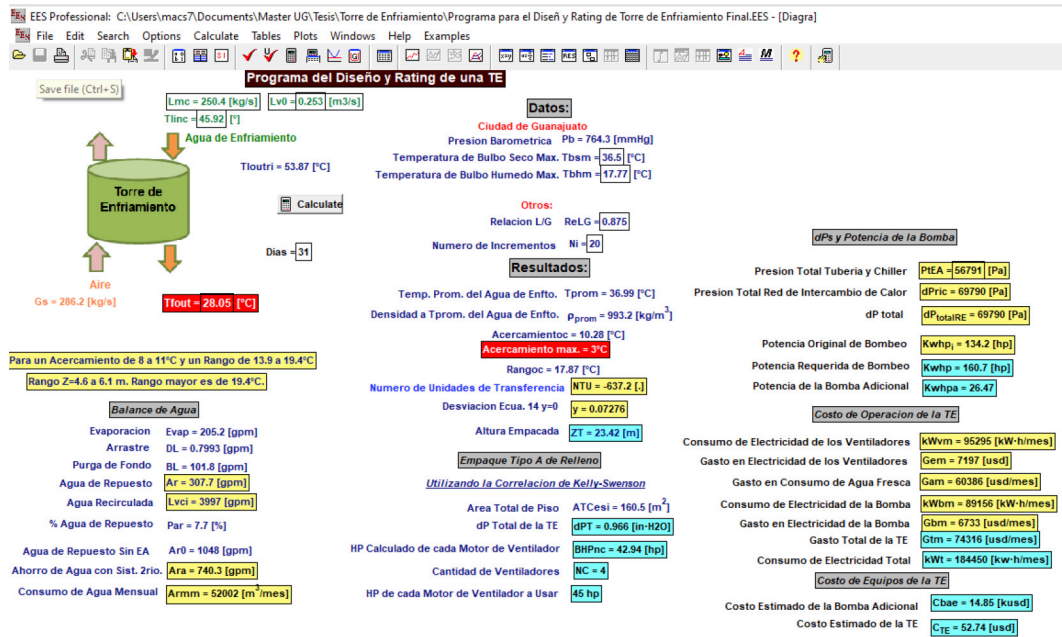
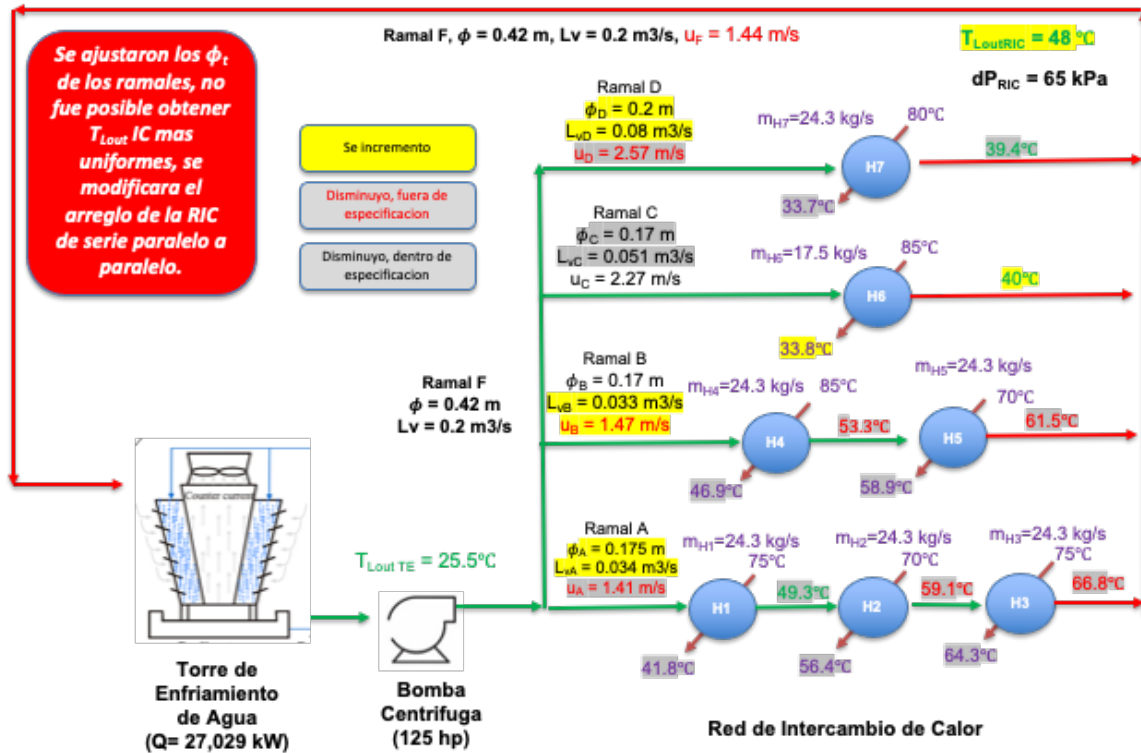


Fig. 9.2. Diseño de la TE en EES para el Caso de Estudio 1

### Solución Propuesta 1.

Se ajustaron los diámetros de las tuberías de los ramales para tratar de ajustar los  $L_v$  en la RIC, con la finalidad de disminuir las  $T_{Lout} AE IC < 50^\circ C$ .

**No se obtuvo el resultado esperado, por lo cual esta propuesta no es viable, vea Fig. 9.3:**



**Fig. 9.3. Diagrama de Flujo de la RE en arreglo serie-paralelo con ajuste de los diámetros de tuberías de los ramales. Caso de Estudio 1**

Se evaluo la integracion de CA, se observo que las  $T_{Lout} AE IC > 50^\circ C$ , por lo cual este tipo de arreglos de IC en la RIC no es viable para obtener los resultados deseados, se procederá en el Caso de Estudio 2, la evaluación de una RIC con arreglo en paralelo.

## Caso de Estudio 2.

Una RE que consta de una TE y una RIC con 7 IC en arreglo paralelo, se encuentra trabajando relativamente bien al límite de su diseño ya que las  $T_{\text{Lout IC-4 y 5}} > 50^{\circ}\text{C}$ , la  $T_{\text{Lout RIC}} = 48.2^{\circ}\text{C}$  ( $T_{\text{Lmax}} = 50^{\circ}\text{C}$ ) y la  $dP_{\text{RIC}} = 120 \text{ kPa}$  (Max. 150 kPa). Vea Fig. 9.4.

Todos los IC son de tubos y coraza.

La RE está instalada en la cd. De Guanajuato, Gto.

La concentración de  $\text{CaCO}_3$  en el agua fresca de repuesto a la TE es de  $0.23 \text{ g/L}$

$$\text{El } L_v = 0.128 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{pH} = 9$$

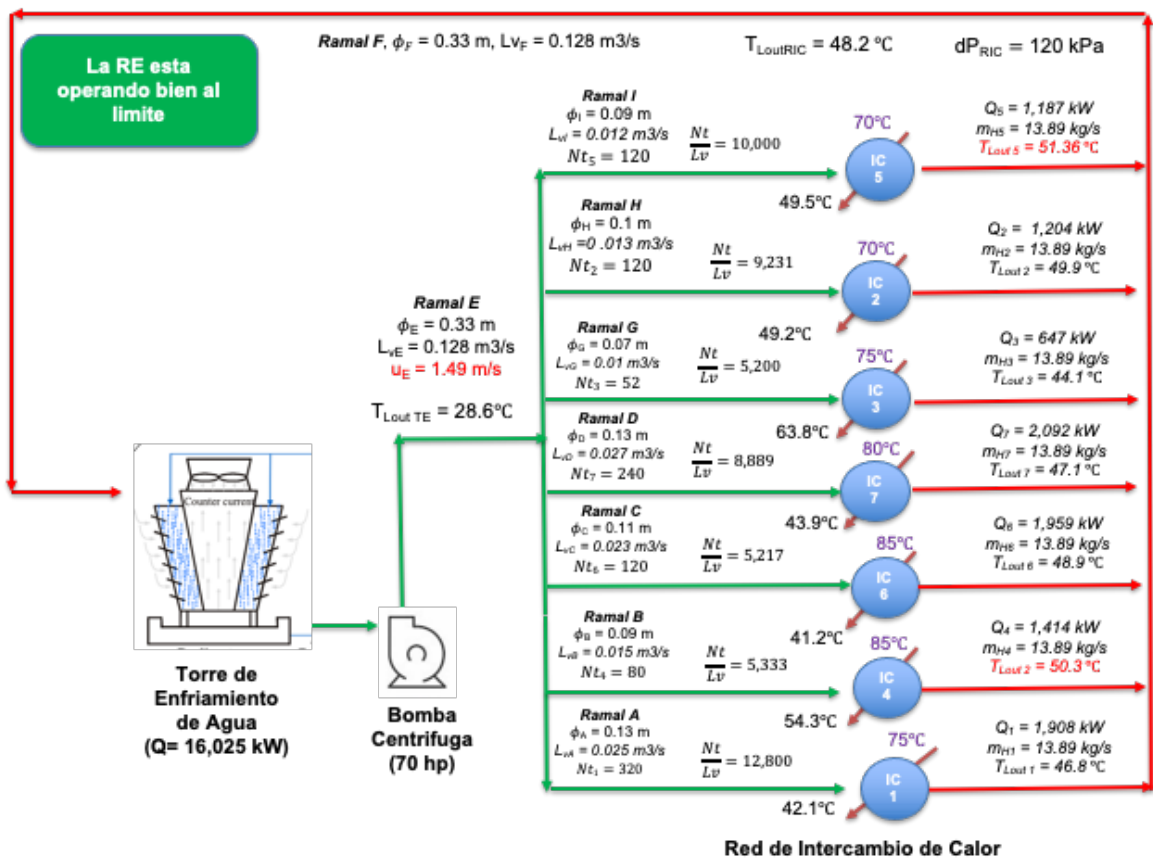


Fig. 9.4. Diagrama de Flujo de la RE con RIC con IC en arreglo paralelo. Caso de Estudio 2

Se diseño y simulo la operación de la TE para las condiciones de operación en EES. Vea Fig. 9.5.

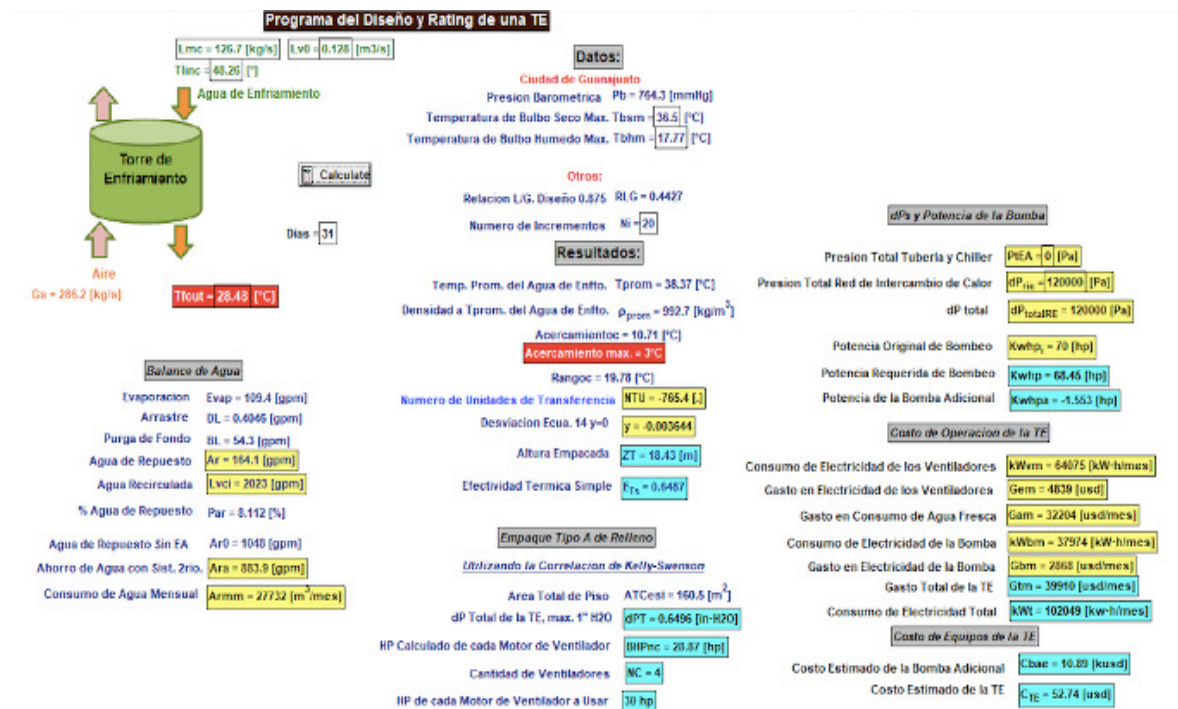


Fig. 9.5. Diseño de la TE en EES para el Caso de Estudio 2

La Tabla 9.3 posee la informacion de las tuberias del RE con sus características.

Tabla 9.3 Tuberias de la RE con sus Características del Caso de Estudio 2

Tuberia	Diametro (m)	Longitud (m)	Elevación (m)
E y F	0.33	160	0
A	0.13	4	3
B	0.09	4	3
C	0.11	4	3
D	0.13	4	3
G	0.07	4	3
H	0.1	4	3
I	0.09	4	3

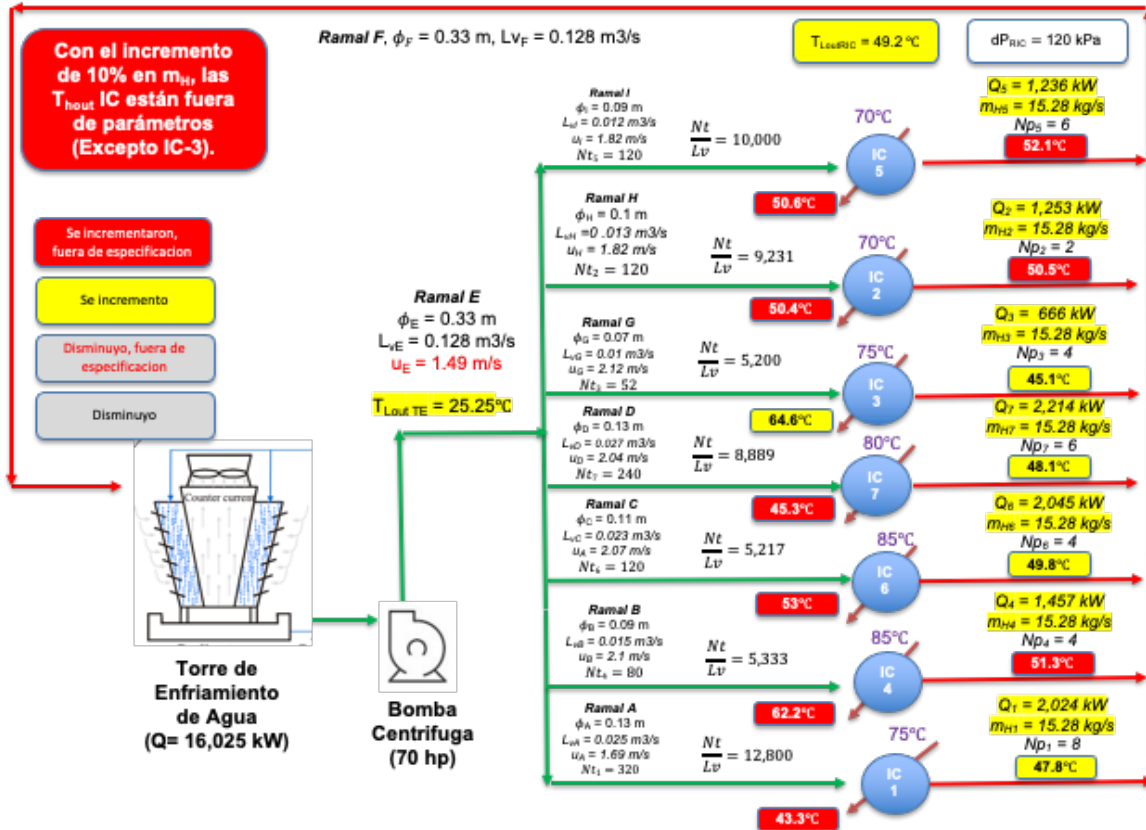
La **Tabla 9.4.** muestra la información termo hidráulica del diseño de los **IC** de la **RIC**.

**Tabla 9.4. Información Termo-hidráulica de los IC de la RIC para el Caso de Estudio 2.**

	IC1	IC2	IC3	IC4	IC5	IC6	IC7
No. de Tubos (Nt)	240	48	24	180	24	360	360
Pit (m)	0.03125	0.0525	0.0625	0.0375	0.0625	0.025	0.03125
Arreglo de los Tubos	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular
No. Pasos por Tubos	6	12	8	6	8	6	6
mH (kg/s)	24.31	24.31	24.31	24.31	24.31	14.58	24.31
T <sub>Lin</sub> (°C)	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8	24.8
T <sub>Hi</sub> (°C)	75	70	85	85	70	85	85
Lt (m)	6.18	4.83	6.18	6.18	7.32	6.18	7.32
Q <sub>i</sub> (m)	0.0218	0.046	0.046	0.0268	0.046	0.0176	0.0218
Ds (m)	0.731	0.749	0.546	0.748	0.566	0.689	0.849
dP Tubos (kPa)	35.11	44.13	42.35	39.91	39.82	37.47	32.08
Q (kW)	3320	1319	1032	3848	1104	3181	4652
Nt / Lv	1293	259	129	970	129	1940	1940
Lv (m <sup>3</sup> /s)	0.03333	0.01328	0.01043	0.03879	0.01112	0.03195	0.04668
Q <sub>t</sub> (m)	0.168	0.106	0.094	0.181	0.097	0.165	0.199
Lv	0.18558	m <sup>3</sup> /s					
ut diseño	1.5	m/s					



Por necesidades de la Empresa se requirió evaluar técnico-económicamente que implicaba el aumentar en un **10%** los flujos de las  $C_H$  de cada IC se incrementaron en tal magnitud las  $m_H$  y el resultado del comportamiento termo-hidráulico de la RE se observa en la **Fig. 9.6**:



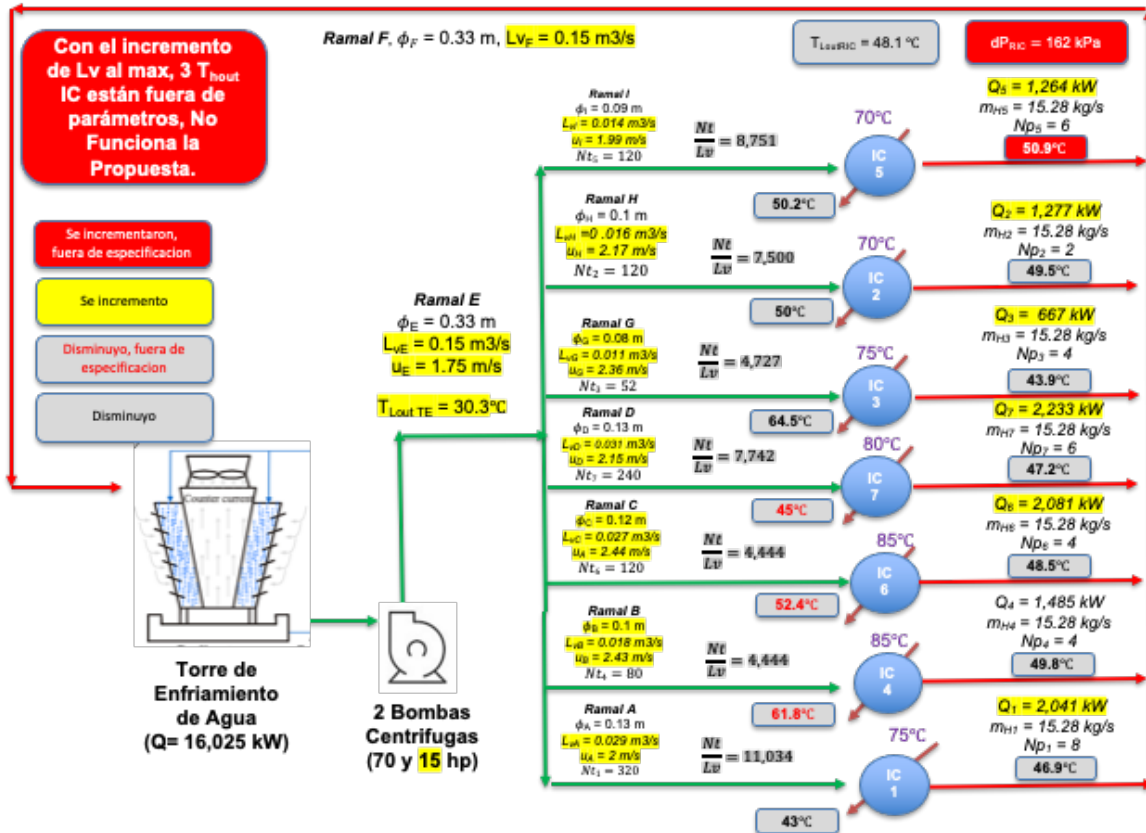
**Fig. 9.6. Diagrama de Flujo de la RE con RIC con IC en arreglo paralelo con aumento de las  $m_H$  en 10%. Caso de Estudio 2**

**Soluciones Propuestas:**

**Aumento del Flujo del AE de la TE ( $L_v$ ) al máx. Vea Fig. 9.7.**

Se aumento  $L_v$  al máx. =  $0.15 \frac{m^3}{s}$ , se observa que las  $T_{Hout}$   $m_H$  de los IC-4, 6 y 7 continúan fuera de especificación, la  $T_{Lout}$  IC-5 es  $> 50^\circ C$ .

**Por lo tanto, esta opción no es viable.**

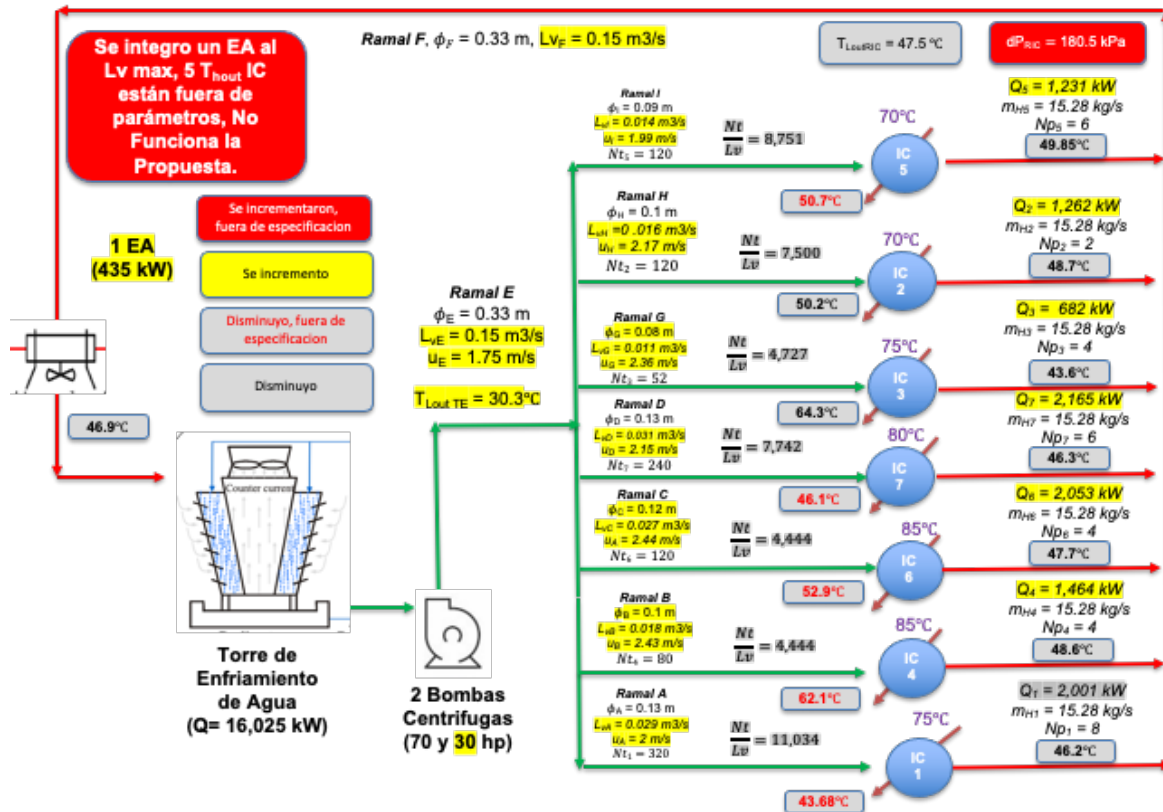


**Fig. 9.7. Diagrama de Flujo de la RE con configuración en paralelo con aumento de  $L_v$  al máx. Caso de Estudio 2**

**Integración de Enfriador de Aire (EA). Vea Fig. 9.8.**

Se evaluó la integración de EA al Lv máx. 5,  $T_{\text{Hout IC-1, 5, 6 y 7}}$  están fuera de parámetros. Como el EA debe instalarse antes que la TE la  $T_{\text{Lout EA min}} = 46.9^{\circ}\text{C}$  debido a que la  $T_{\text{BHmax}} = 36.9^{\circ}\text{C}$  y el  $dT_{\text{min}} = 10^{\circ}\text{C}$ .

**Por lo tanto, esta opción no es viable.**

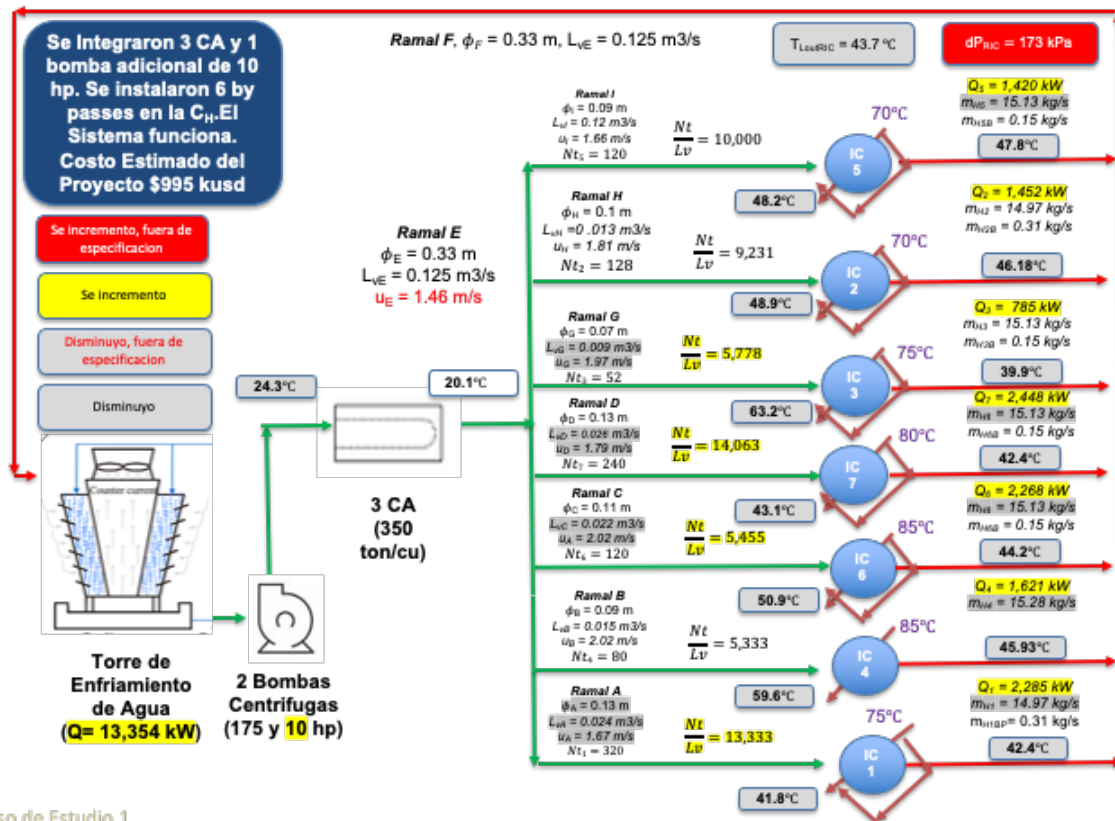


**Fig. 9.8. Diagrama de Flujo de la RE con configuración en paralelo con Integración de 1 EA y Lv máx. Caso de Estudio 2**

**Integración de Chiller para Agua. Vea Fig. 9.9.**

Se integraron 3 CA de 350 Ton/cada uno, se adicióno 1 bomba de 10 hp para contrarrestar la caída de presión adicional generada por los CA y 6 by passes para regular las T<sub>Hout</sub> excepto en el IC-4. Se disminuyo L<sub>v</sub>.

**Bajo estas condiciones la RE opera satisfactoriamente. Esta opción es viable.**



Caso de Estudio 1.

**Fig. 9.9. Diagrama de Flujo de la RE con Integración de 3 CA. Caso de Estudio 2**

La Fig. 9.10 se muestra el diseño y simulación de los CA.

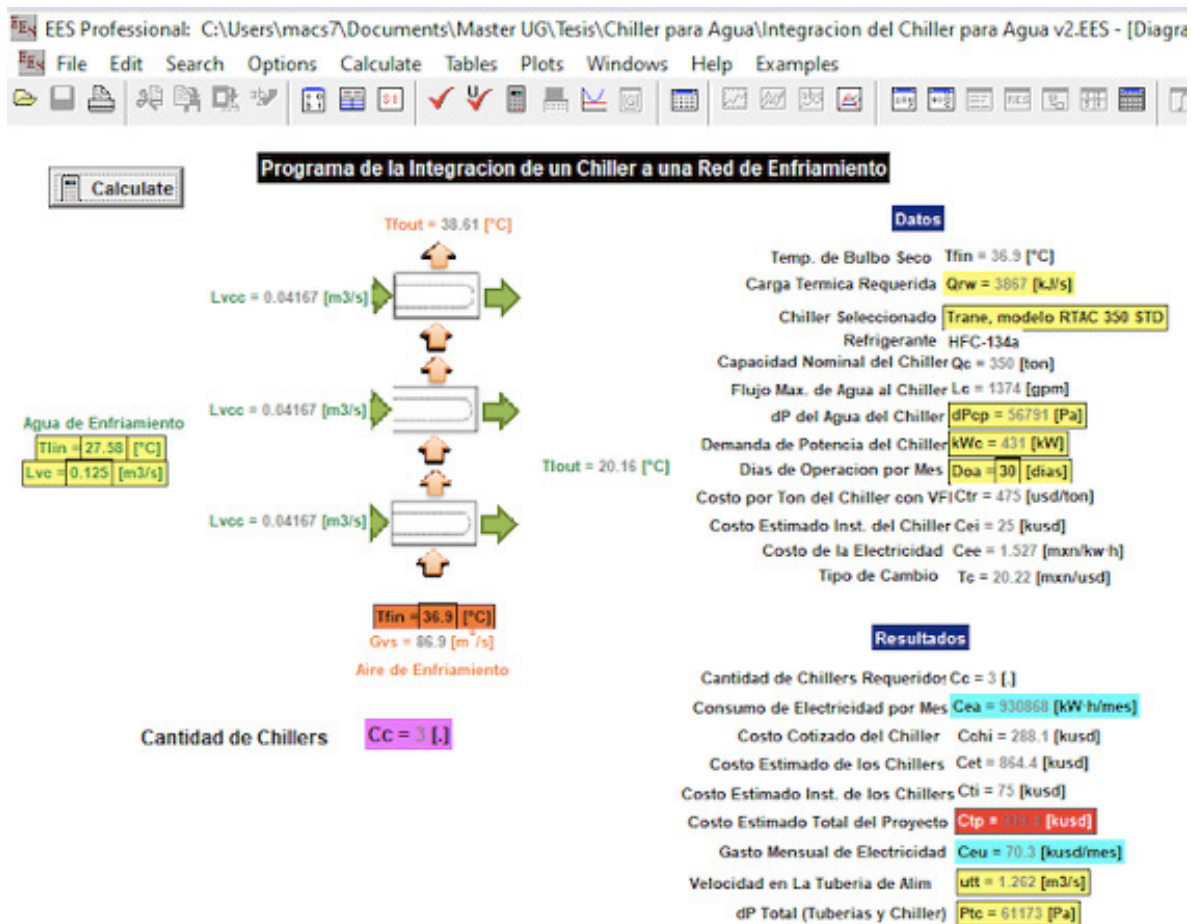


Fig. 9.10. Diagrama de Flujo del Diseño y Simulación de los CA en EES. Caso de Estudio 2

La **Tabla 9.5.** muestra la tendencia de las  $T_{Hout}$  **IC vs.  $t_{op}$  RE**, la  $T_{Hout}$  **IC-2** sale de especificación a los **5.1 años**, la  $T_{Hout}$  **IC-4** a los **2.8 y 4.9 años** y la  $T_{Hout}$  **IC-6** a los **3.7 años** vs. la  $dT_{Hout}$  **máx.** Establecida (**1°C**).

**Tabla 9.5. Tendencia de la  $T_{Hout}$  IC vs.  $t_{op}$  RE con la Integración de CA. Caso de Estudio 2**

t (años)	Thout [C]						
	IC1	IC2	IC3	IC4	IC5	IC6	IC7
0.0	42.14	49.27	63.88	60.7	49.56	51.31	43.99
0.2	41.88	48.95	63.2	59.67	48.62	50.9	43.16
0.4	41.91	49.03	63.29	59.89	48.7	51	43.2
0.6	41.94	49.1	63.36	60.09	48.77	51.1	43.24
0.8	41.97	49.17	63.43	60.26	48.84	51.19	43.28
1.0	41.99	49.23	63.49	60.43	48.9	51.28	43.32
1.2	42.02	49.29	63.55	60.58	48.96	51.36	43.36
1.4	42.04	49.35	63.61	60.72	49.02	51.44	43.39
1.6	42.07	49.41	63.66	60.86	49.07	51.52	43.43
1.8	42.09	49.46	63.71	60.99	49.13	51.6	43.46
2.0	42.11	49.52	63.76	61.12	49.18	51.67	43.5
2.2	42.14	49.57	63.8	61.24	49.23	51.75	43.53
2.4	42.16	49.62	63.85	61.36	49.28	51.82	43.56
2.6	42.18	49.67	63.89	61.48	49.32	51.89	43.59
2.8	42.2	49.72	63.94	61.59	49.37	51.96	43.63
3.0	42.23	49.77	63.98	61.7	49.42	52.02	43.66
3.1	42.25	49.81	64.02	61.81	49.46	52.09	43.69
3.3	42.27	49.86	64.06	61.91	49.51	52.16	43.72
3.5	42.29	49.9	64.09	62.01	49.55	52.22	43.75
3.7	42.31	49.95	64.13	62.11	49.59	52.29	43.78
3.9	42.33	49.99	64.17	62.21	49.63	52.35	43.81
4.1	42.35	50.03	64.2	62.3	49.67	52.41	43.84
4.3	42.37	50.07	64.24	62.4	49.71	52.47	43.87
4.5	42.39	50.12	64.27	62.49	49.75	52.53	43.89
4.7	42.41	50.16	64.3	62.58	49.79	52.59	43.92
4.9	42.43	50.2	64.34	62.66	49.83	52.65	43.95
5.1	42.45	50.24	64.37	62.75	49.87	52.71	43.98
5.3	42.47	50.28	64.4	62.83	49.91	52.77	44.01
5.5	42.49	50.32	64.43	62.92	49.95	52.82	44.03
5.7	42.51	50.35	64.46	63	49.98	52.88	44.06
5.9	42.53	50.39	64.49	63.08	50.02	52.94	44.09
$dT_{Hout}$ [C]	0.65	1.44	1.29	3.41	1.4	2.04	0.93

La **Tabla 9.6.** muestra la tendencia de la **dP<sub>RE</sub>** y **T<sub>Lout RIC</sub>** vs. **t<sub>op RE</sub>**, la **dP<sub>RE</sub>** se incrementa en **2.3 kPa** en **5.7 años** y la **T<sub>Lout RIC</sub>** disminuye **1.42°C** en **5.7 años**.

**Tabla 9.6. Tendencia de la T<sub>Hout IC</sub> vs. t<sub>op</sub> de la RE con la Integración de CA. Caso de Estudio 2**

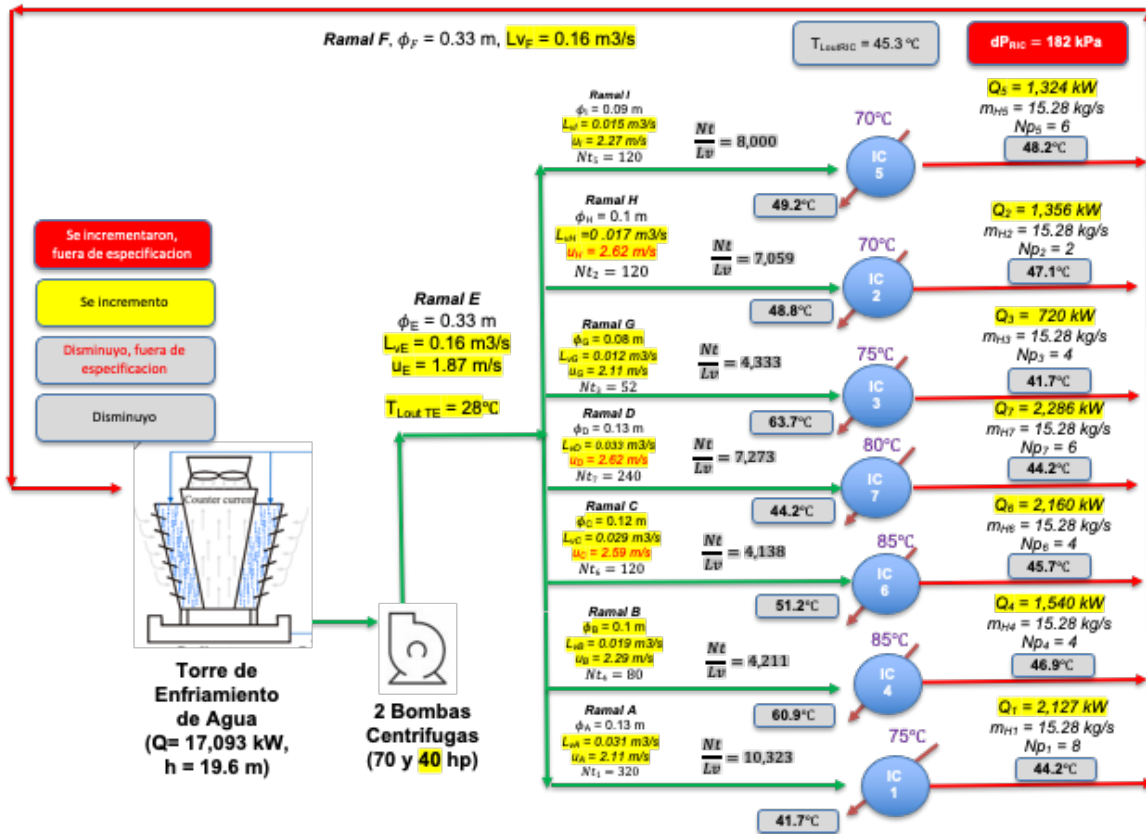
<b>t (años)</b>	<b>dP RE (kPa)</b>	<b>T<sub>lout RIC</sub> [C]</b>
0.0	116.3	43.76
0.2	116.4	43.68
0.4	116.5	43.61
0.6	116.6	43.54
0.8	116.7	43.47
1.0	116.8	43.41
1.2	116.9	43.35
1.4	117	43.3
1.6	117.1	43.24
1.8	117.1	43.19
2.0	117.2	43.14
2.2	117.3	43.09
2.4	117.4	43.04
2.6	117.5	42.99
2.8	117.5	42.95
3.0	117.6	42.9
3.1	117.7	42.86
3.3	117.8	42.81
3.5	117.8	42.77
3.7	117.9	42.73
3.9	118	42.69
4.1	118	42.65
4.3	118.1	42.61
4.5	118.2	42.57
4.7	118.2	42.53
4.9	118.3	42.49
5.1	118.4	42.45
5.3	118.4	42.41
5.5	118.5	42.38
5.7	118.6	42.34



**Reemplazo de la TE por una de Mayor Capacidad. Vea Fig. 9.11.**

Se reemplazo la TE por una de mayor capacidad **17.1 kW**, se requiere **1 bomba adicional de 40 hp** para contrarrestar la caída de presión adicional generada, bajo estas nuevas condiciones de operación todas la  $T_{Hout}$  y  $T_{Lout}$  TE están dentro de los parámetros establecidos.

**Bajo estas condiciones la RE opera bien. Esta opción es viable.**



**Fig. 9.11. Diagrama de Flujo de la RE en paralelo con la nueva TE. Caso de Estudio 2**



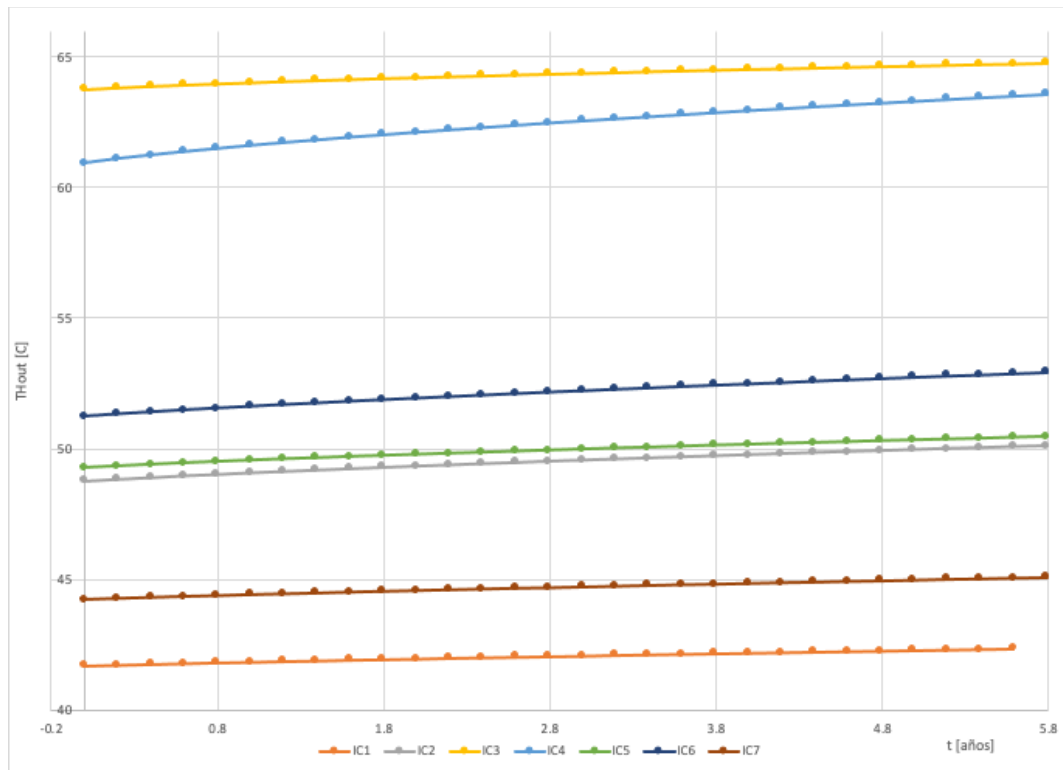
**Se considero una [CaCO3] = 0.25 g/L en el agua fresca de repuesto a la TE.**

La **Tabla 9.7.** muestra la tendencia de las  $T_{Hout}$  IC vs.  $t_{op}$  RE, la  $T_{Hout}$  IC-4 sale de especificación a los **1.2 y 3.4 años**, la  $T_{Hout}$  IC-6 a los **3.4 años** y la  $T_{Hout}$  IC-7 a los **5.2 años** vs. la  $dT_{Hout}$  máx. Establecido ( $1^{\circ}C$ ).

**Tabla 9.7. Tendencia de la  $T_{Hout}$  IC vs.  $t_{op}$  RE con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**

t (años)	Thout [C]						
	IC1	IC2	IC3	IC4	IC5	IC6	IC7
0.0	41.7	48.78	63.74	60.93	49.28	51.22	44.22
0.2	41.73	48.85	63.81	61.1	49.34	51.31	44.26
0.4	41.76	48.91	63.87	61.24	49.4	51.39	44.3
0.6	41.79	48.98	63.92	61.37	49.46	51.47	44.34
0.8	41.82	49.03	63.97	61.49	49.51	51.54	44.37
1.0	41.84	49.09	64.01	61.61	49.56	51.61	44.41
1.2	41.87	49.14	64.06	61.72	49.61	51.68	44.44
1.4	41.89	49.19	64.1	61.82	49.65	51.74	44.47
1.6	41.92	49.24	64.14	61.93	49.7	51.81	44.51
1.8	41.94	49.29	64.18	62.02	49.74	51.87	44.54
2.0	41.96	49.34	64.21	62.12	49.78	51.93	44.57
2.2	41.99	49.38	64.25	62.21	49.82	51.99	44.6
2.4	42.01	49.43	64.28	62.3	49.86	52.05	44.63
2.6	42.03	49.47	64.32	62.39	49.9	52.11	44.66
2.8	42.05	49.52	64.35	62.48	49.94	52.17	44.68
3.0	42.07	49.56	64.38	62.56	49.98	52.22	44.71
3.2	42.1	49.6	64.41	62.64	50.02	52.28	44.74
3.4	42.12	49.64	64.45	62.72	50.05	52.33	44.77
3.6	42.14	49.68	64.48	62.8	50.09	52.39	44.8
3.8	42.16	49.72	64.51	62.88	50.13	52.44	44.82
4.0	42.18	49.76	64.54	62.96	50.16	52.49	44.85
4.2	42.2	49.8	64.56	63.03	50.2	52.54	44.88
4.4	42.22	49.84	64.59	63.11	50.23	52.6	44.9
4.6	42.24	49.88	64.62	63.18	50.26	52.65	44.93
4.8	42.26	49.91	64.65	63.25	50.3	52.7	44.95
5.0	42.28	49.95	64.67	63.32	50.33	52.75	44.98
5.2	42.3	49.99	64.7	63.39	50.36	52.8	45.01
5.4	42.32	50.02	64.73	63.46	50.39	52.84	45.03
5.6	42.34	50.06	64.75	63.52	50.43	52.89	45.06
5.8	42.36	50.09	64.78	63.59	50.46	52.94	45.08
SP [C]	42.14	49.27	63.88	60.7	49.56	51.31	43.99

La **Fig. 9.12** muestra la tendencia de las  $T_{Hout}$  IC vs.  $t_{op}$  RE, se observa una mayor pendiente de crecimiento en la curva de la  $T_{Hout}$  IC-4



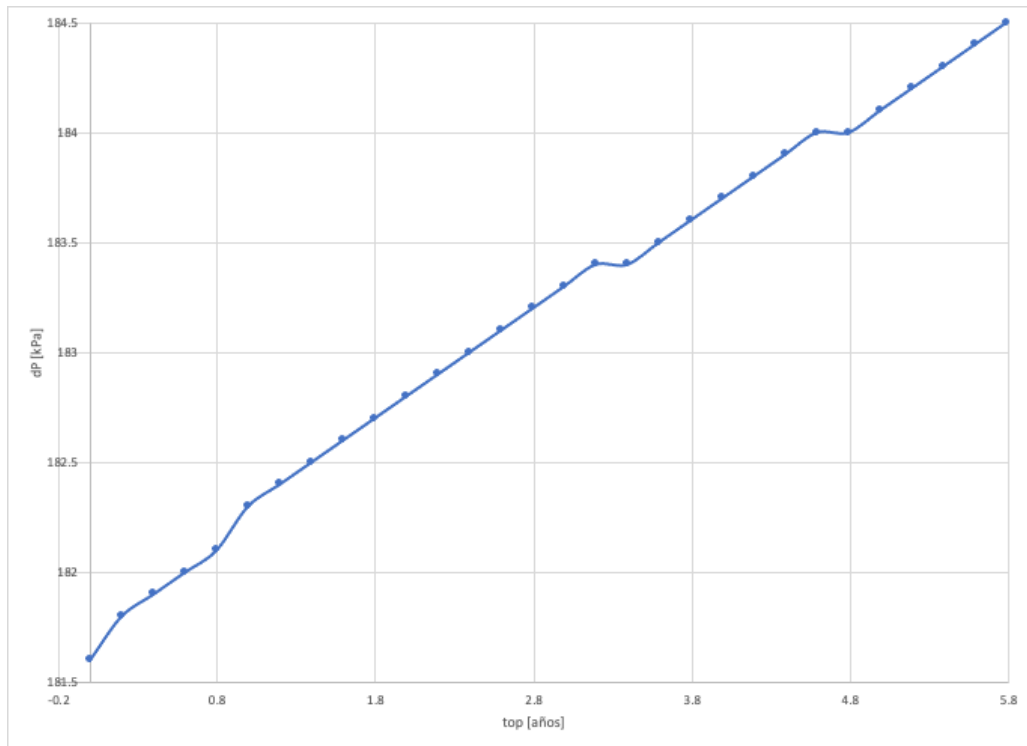
**Fig. 9.12. Grafica de la tendencia de la  $T_{Hout}$  IC vs.  $t_{op}$  de la RE con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**

La **Tabla 9.8.** muestra la tendencia de la  $dP_{RE}$  y  $T_{Lout\ RIC}$  vs.  $t_{op\ RE}$ , la  $dP_{RE}$  se incrementa en **2.9 kPa** y la  $T_{Lout\ RIC}$  disminuye **0.91°C** en **5.8 años**.

**Tabla 9.8. Tendencia de la  $T_{Hout\ IC}$  vs.  $t_{op\ RE}$  con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**

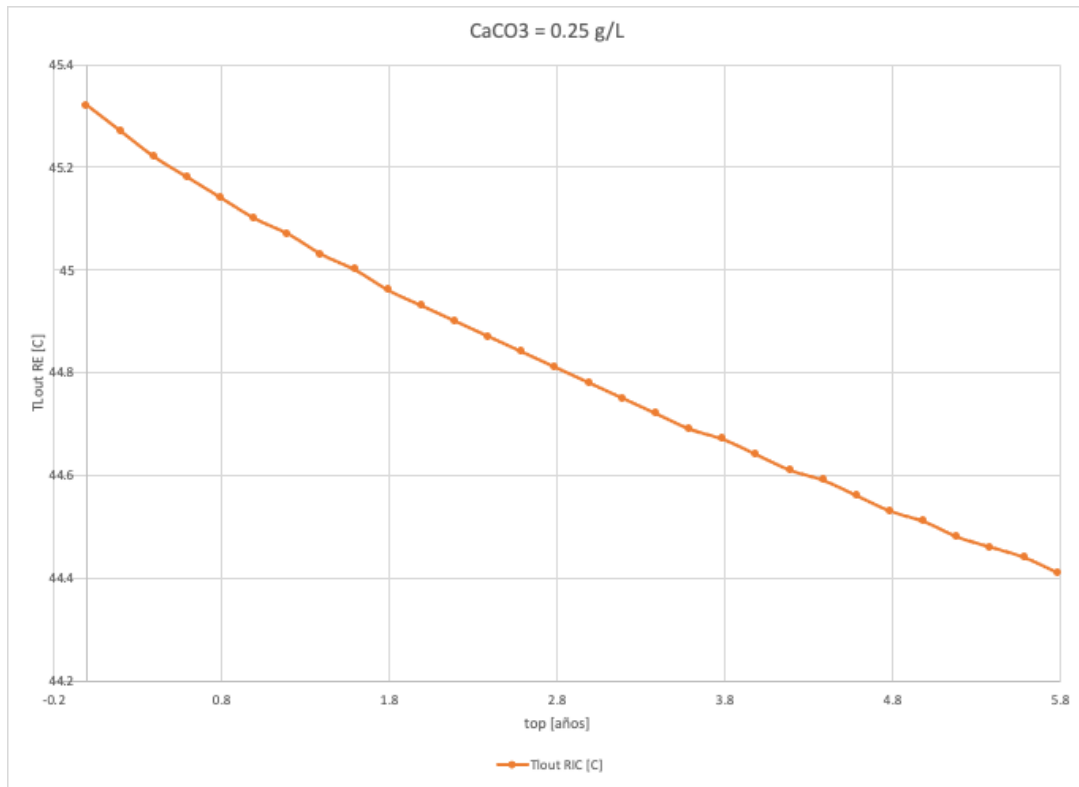
t (años)	dP RE (kPa)	Tlout RIC [C]
0.0	181.6	45.32
0.2	181.8	45.27
0.4	181.9	45.22
0.6	182	45.18
0.8	182.1	45.14
1.0	182.3	45.1
1.2	182.4	45.07
1.4	182.5	45.03
1.6	182.6	45
1.8	182.7	44.96
2.0	182.8	44.93
2.2	182.9	44.9
2.4	183	44.87
2.6	183.1	44.84
2.8	183.2	44.81
3.0	183.3	44.78
3.2	183.4	44.75
3.4	183.4	44.72
3.6	183.5	44.69
3.8	183.6	44.67
4.0	183.7	44.64
4.2	183.8	44.61
4.4	183.9	44.59
4.6	184	44.56
4.8	184	44.53
5.0	184.1	44.51
5.2	184.2	44.48
5.4	184.3	44.46
5.6	184.4	44.44
5.8	184.5	44.41
5.8	2.9	-0.91

La Fig. 9.13 muestra la tendencia de la  $dP_{RE}$  vs.  $t_{op}$  RE.



**Fig. 9.13. Grafica de la tendencia de la  $dP_{RE}$  vs.  $t_{op}$  RE con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**

La Fig. 9.14 muestra la tendencia de la  $T_{Lout\ RIC}$  vs.  $t_{op\ RE}$ .



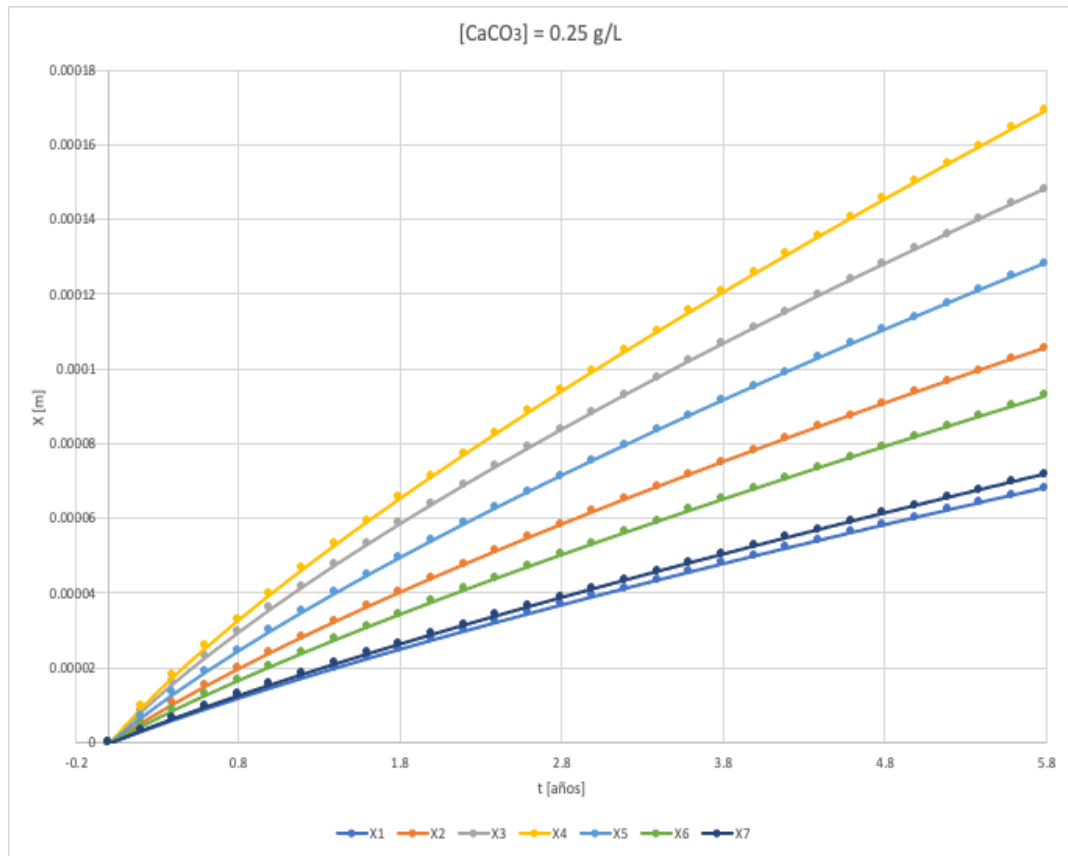
**Fig. 9.14. Grafica de la tendencia de la  $T_{Lout\ RIC}$  vs.  $t_{op\ RE}$  con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**

La **Tabla 9.9.** muestra la tendencia del **X IC vs.  $t_{op}$  RE**, los **IC** que más se ensucian son **4 > 3 > 5**.

**Tabla 9.9. Tendencia del X IC vs.  $t_{op}$  RE con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**

t (años)	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
0.0	0	0	0.00E+00	0	0.00E+00	0.00E+00	0
0.2	3.213E-06	5.499E-06	8.508E-06	9.504E-06	6.911E-06	4.594E-06	3.417E-06
0.4	6.272E-06	0.00001057	0.00001608	0.00001791	0.00001321	8.872E-06	6.656E-06
0.6	9.206E-06	0.00001534	0.00002305	0.00002567	0.00001909	0.00001292	9.755E-06
0.8	0.00001204	0.00001987	0.00002961	0.00003297	0.00002466	0.00001679	0.00001274
1.0	0.00001478	0.00002422	0.00003585	0.00003993	0.00002998	0.00002052	0.00001563
1.2	0.00001745	0.00002841	0.00004182	0.00004661	0.0000351	0.00002414	0.00001844
1.4	0.00002005	0.00003247	0.00004757	0.00005307	0.00004005	0.00002765	0.00002117
1.6	0.00002259	0.00003642	0.00005314	0.00005934	0.00004485	0.00003108	0.00002384
1.8	0.00002508	0.00004027	0.00005855	0.00006545	0.00004953	0.00003443	0.00002646
2.0	0.00002752	0.00004403	0.00006381	0.00007141	0.00005409	0.00003772	0.00002902
2.2	0.00002992	0.00004771	0.00006895	0.00007725	0.00005856	0.00004095	0.00003154
2.4	0.00003228	0.00005132	0.00007397	0.00008297	0.00006293	0.00004412	0.00003402
2.6	0.00003459	0.00005486	0.00007889	0.00008858	0.00006721	0.00004724	0.00003645
2.8	0.00003688	0.00005834	0.00008371	0.0000941	0.00007142	0.00005032	0.00003886
3.0	0.00003913	0.00006177	0.00008844	0.00009953	0.00007556	0.00005335	0.00004122
3.2	0.00004135	0.00006514	0.0000931	0.0001049	0.00007963	0.00005635	0.00004356
3.4	0.00004355	0.00006846	0.00009767	0.0001102	0.00008365	0.00005931	0.00004587
3.6	0.00004572	0.00007174	0.0001022	0.0001154	0.0000876	0.00006224	0.00004815
3.8	0.00004786	0.00007498	0.0001066	0.0001205	0.0000915	0.00006514	0.0000504
4.0	0.00004998	0.00007818	0.000111	0.0001256	0.00009535	0.00006801	0.00005263
4.2	0.00005208	0.00008133	0.0001153	0.0001306	0.00009915	0.00007085	0.00005484
4.4	0.00005415	0.00008445	0.0001196	0.0001356	0.0001029	0.00007366	0.00005703
4.6	0.00005621	0.00008754	0.0001238	0.0001405	0.0001066	0.00007645	0.00005919
4.8	0.00005825	0.0000906	0.0001279	0.0001454	0.0001103	0.00007922	0.00006134
5.0	0.00006026	0.00009362	0.000132	0.0001502	0.0001139	0.00008196	0.00006346
5.2	0.00006226	0.00009661	0.0001361	0.000155	0.0001175	0.00008468	0.00006557
5.4	0.00006425	0.00009958	0.0001401	0.0001597	0.0001211	0.00008738	0.00006766
5.6	0.00006622	0.0001025	0.0001441	0.0001644	0.0001246	0.00009007	0.00006974
5.8	0.00006817	0.0001054	0.000148	0.0001691	0.0001281	0.00009273	0.0000718
$\bar{Q}$ int tubos IC (m)	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218
$\bar{Q}$ tubos IC libre (m)	0.02173183	0.0216946	0.021652	0.0216309	0.0216719	0.02170727	0.0217282
% $\bar{Q}$ tubos IC libre	99.69%	99.52%	99.32%	99.22%	99.41%	99.57%	99.67%

La Fig. 9.15 muestra la tendencia del X IC vs. t<sub>op</sub> RE.



**Fig. 9.15. Grafica de la Tendencia del X IC vs. t<sub>op</sub> RE con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**

Se considero una  $[CaCO_3] = 0.35 \text{ g/L}$  en el agua fresca de repuesto a la TE.

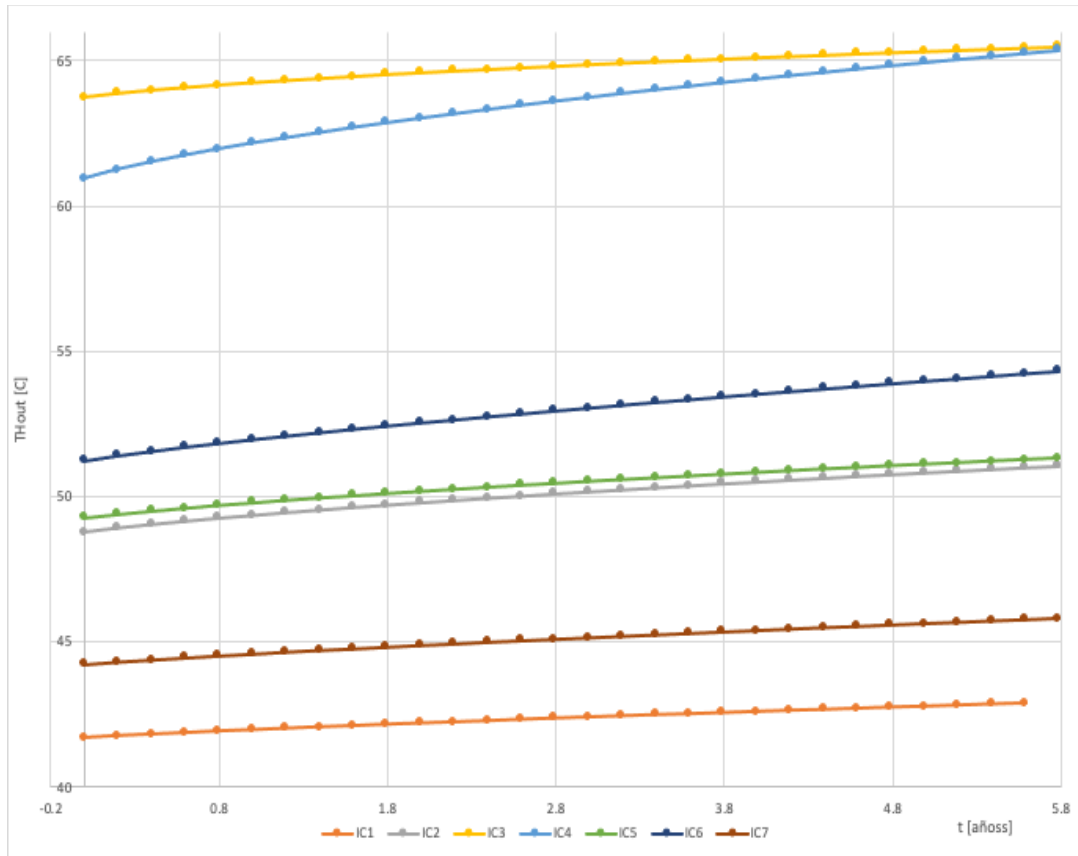
La Tabla 9.10 muestra la tendencia de las  $T_{Hout \text{ IC}}$  vs.  $t_{op \text{ RE}}$ , el IC-2 sale de especificación a los 3.4 años, el IC-3 a los 3.2 años, el IC-4 a los 0.6, 1.6, 3 y 4.6 años, el IC-5 a los 3.2 años, el IC-6 a los 1.6, 3.6 y 5.8 años, el IC-7 a los 2.4 años.

**Tabla 9.10. Tendencia de la  $T_{Hout \text{ IC}}$  vs.  $t_{op \text{ RE}}$  con el Reemplazo de la TE con  $[CaCO_3] = 0.35 \text{ g/L}$  en el Agua de Repuesto. Caso de Estudio 2**

	Thout [C]						
t (años)	IC1	IC2	IC3	IC4	IC5	IC6	IC7
SP [C]	42.14	49.27	63.88	60.7	49.56	51.31	43.99
0.0	41.7	48.78	63.74	60.93	49.28	51.22	44.22
0.2	41.77	48.92	63.87	61.25	49.4	51.4	44.31
0.4	41.82	49.04	63.98	61.51	49.51	51.55	44.38
0.6	41.87	49.15	64.07	61.74	49.61	51.7	44.45
0.8	41.93	49.26	64.16	61.96	49.71	51.83	44.52
1.0	41.97	49.35	64.24	62.16	49.79	51.96	44.58
1.2	42.02	49.45	64.31	62.34	49.88	52.08	44.65
1.4	42.07	49.54	64.38	62.52	49.96	52.2	44.71
1.6	42.11	49.63	64.45	62.7	50.03	52.32	44.76
1.8	42.16	49.71	64.52	62.86	50.11	52.43	44.82
2.0	42.2	49.79	64.58	63.02	50.18	52.54	44.88
2.2	42.24	49.87	64.64	63.17	50.25	52.64	44.93
2.4	42.28	49.95	64.69	63.32	50.32	52.75	44.99
2.6	42.33	50.02	64.75	63.47	50.39	52.85	45.04
2.8	42.37	50.1	64.8	63.61	50.45	52.95	45.09
3.0	42.41	50.17	64.86	63.74	50.52	53.05	45.14
3.2	42.45	50.24	64.91	63.88	50.58	53.15	45.19
3.4	42.49	50.31	64.96	64.01	50.64	53.25	45.24
3.6	42.52	50.38	65	64.13	50.7	53.34	45.29
3.8	42.56	50.45	65.05	64.26	50.76	53.44	45.34
4.0	42.6	50.51	65.1	64.38	50.82	53.53	45.39
4.2	42.64	50.58	65.14	64.5	50.88	53.62	45.44
4.4	42.67	50.64	65.18	64.61	50.94	53.71	45.49
4.6	42.71	50.71	65.23	64.73	50.99	53.8	45.53
4.8	42.75	50.77	65.27	64.84	51.05	53.89	45.58
5.0	42.78	50.83	65.31	64.95	51.1	53.98	45.63
5.2	42.82	50.89	65.35	65.06	51.15	54.06	45.67
5.4	42.86	50.95	65.39	65.16	51.21	54.15	45.72
5.6	42.89	51.01	65.43	65.27	51.26	54.24	45.76
5.8	42.93	51.06	65.47	65.37	51.31	54.32	45.81
dThout [C]	1.23	2.28	1.73	4.44	2.03	3.1	1.59
dt [meses]	5.8	42.9	51.1	65.5	65.4	51.3	54.3



La **Fig. 9.16** muestra la tendencia de las  $T_{Hout}$  IC vs.  $t_{op}$  RE, se observa una mayor pendiente de crecimiento en la curva de la  $T_{Hout}$  IC-4



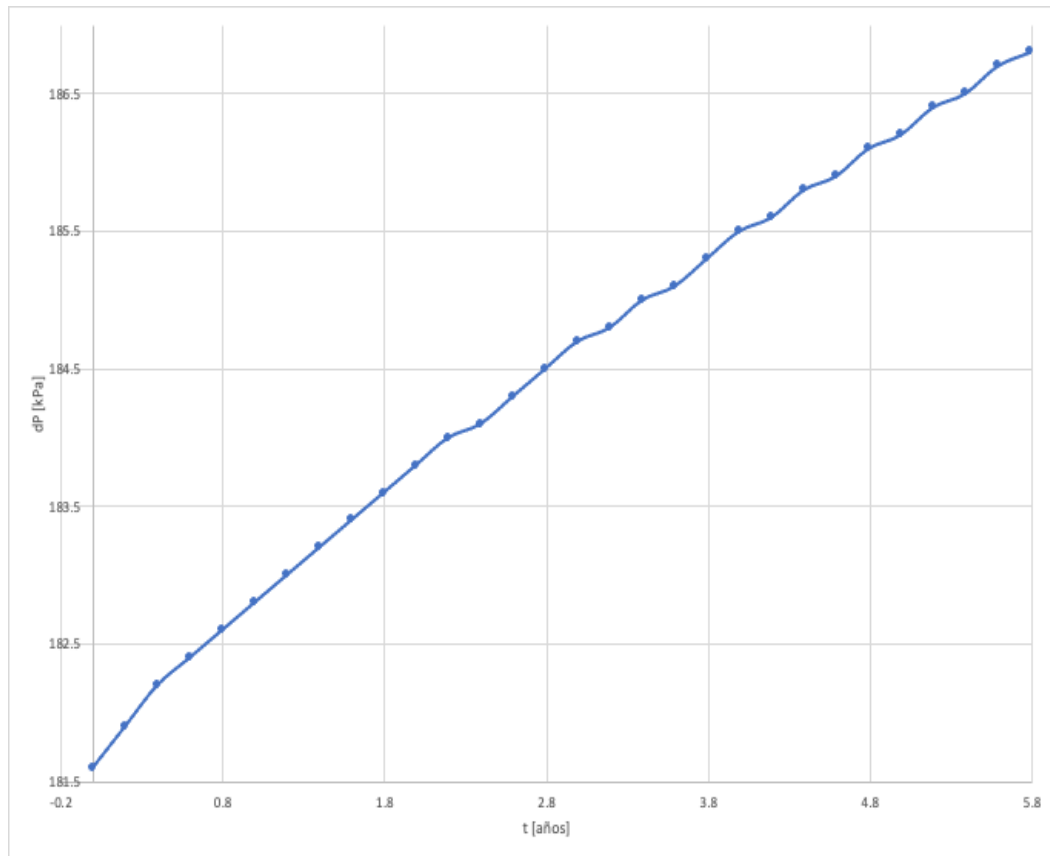
**Fig. 9.16.** Grafica de la tendencia de la  $T_{Hout}$  IC vs.  $t_{op}$  de la RE con el Reemplazo de la TE y  $[CaCO_3] = 0.35$  g/L en el Agua de Repuesto. Caso de Estudio 2

La **Tabla 9.11** muestra la tendencia de la  $dP_{RE}$  y  $T_{Lout\ RIC}$  vs.  $t_{op\ RE}$ , la  $dP_{RE}$  se incrementa en **5.2 kPa** en **5.7 años** y la  $T_{Lout\ RIC}$  disminuye **1.58°C** en **5.7 años**.

**Tabla 9.11. Tendencia de la  $T_{Hout\ IC}$  vs.  $t_{op\ RE}$  con el Reemplazo de la TE y  $[CaCO_3] = 0.35\text{ g/L}$ . Caso de Estudio 2**

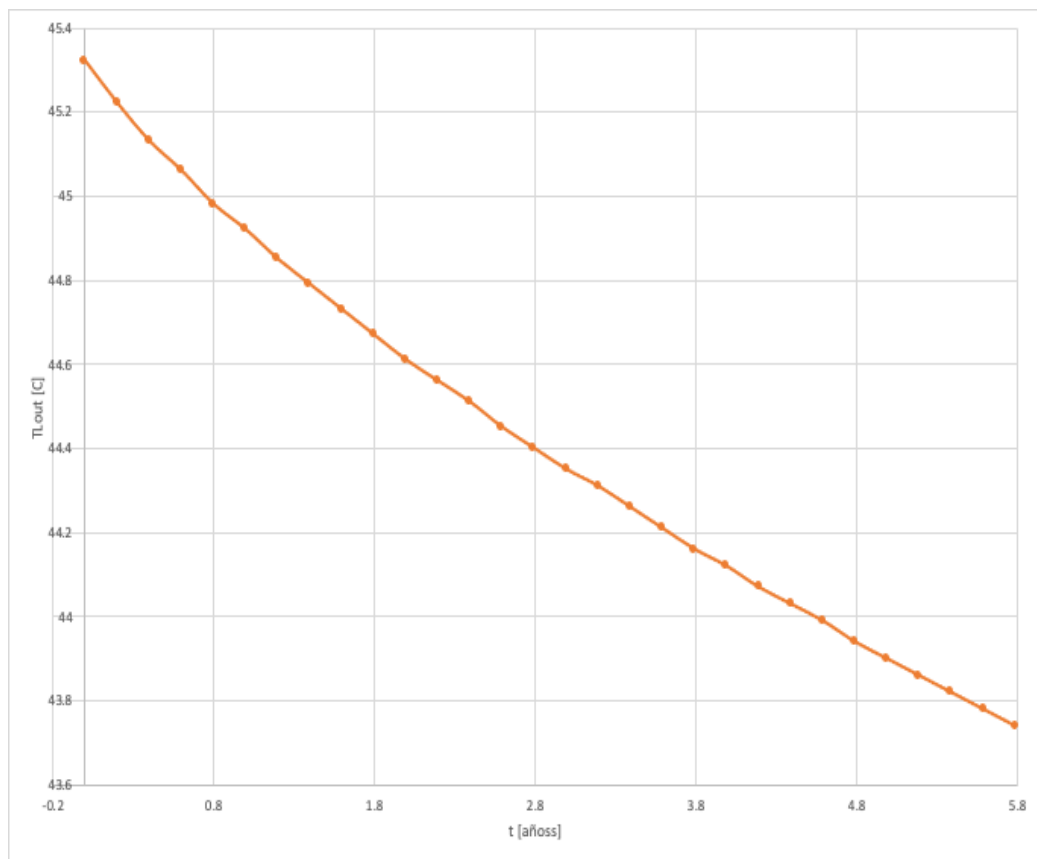
t (años)	dP RE (kPa)	Tlout RIC [C]
0.0	181.6	45.32
0.2	181.9	45.22
0.4	182.2	45.13
0.6	182.4	45.06
0.8	182.6	44.98
1.0	182.8	44.92
1.2	183	44.85
1.4	183.2	44.79
1.6	183.4	44.73
1.8	183.6	44.67
2.0	183.8	44.61
2.2	184	44.56
2.4	184.1	44.51
2.6	184.3	44.45
2.8	184.5	44.4
3.0	184.7	44.35
3.2	184.8	44.31
3.4	185	44.26
3.6	185.1	44.21
3.8	185.3	44.16
4.0	185.5	44.12
4.2	185.6	44.07
4.4	185.8	44.03
4.6	185.9	43.99
4.8	186.1	43.94
5.0	186.2	43.9
5.2	186.4	43.86
5.4	186.5	43.82
5.6	186.7	43.78
5.8	186.8	43.74
5.8	5.2	-1.58

La Fig. 9.17 muestra la tendencia de la  $dP_{RE}$  vs.  $t_{op RE}$ .



**Fig. 9.17. Grafica de la tendencia de la  $dP_{RE}$  vs.  $t_{op RE}$  con el Reemplazo de la TE y  $[CaCO_3] = 0.35$  g/L. Caso de Estudio 2**

La Fig. 9.18 muestra la tendencia de la  $T_{Lout}$  RIC vs.  $t_{op}$  RE.



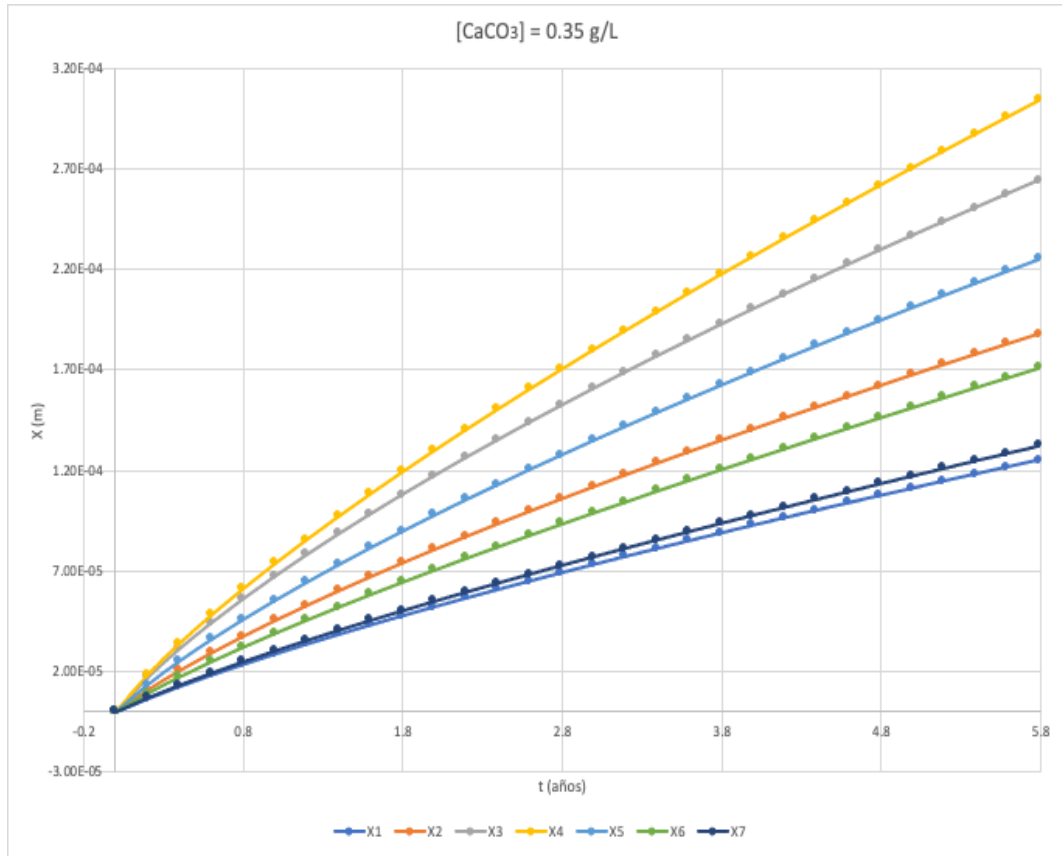
**Fig. 9.18. Grafica de la tendencia de la  $T_{Lout}$  RIC vs.  $t_{op}$  RE con el Reemplazo de la TE y  $[CaCO_3] = 0.35$  g/L. Caso de Estudio 2**

La **Tabla 9.12** muestra la tendencia del **X IC vs.  $t_{op}$  RE**, los **IC** que más se ensucian son **4 > 3 > 5**.

**Tabla 9.12. Tendencia del X IC vs.  $t_{op}$  RE con el Reemplazo de la TE y  $[CaCO_3] = 0.35$  g/L. Caso de Estudio 2**

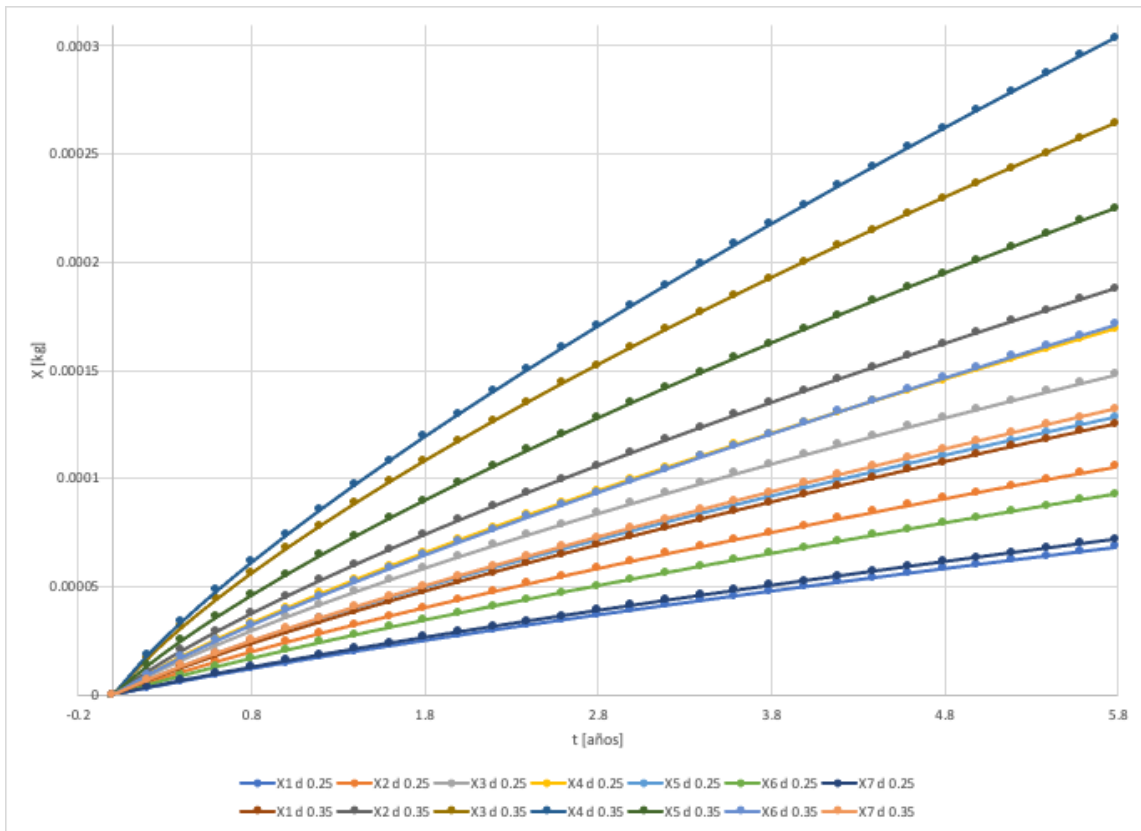
t (años)	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
0.0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
0.2	6.575E-06	0.00001091	0.00001703	0.00001847	0.00001354	9.209E-06	6.973E-06
0.4	0.0000126	0.00002049	0.00003132	0.00003399	0.00002527	0.00001742	0.00001333
0.6	0.00001826	0.00002929	0.0000442	0.00004806	0.00003596	0.00002502	0.00001928
0.8	0.00002362	0.00003754	0.00005615	0.0000612	0.00004595	0.00003222	0.00002492
1.0	0.00002876	0.00004538	0.00006742	0.00007367	0.00005541	0.00003909	0.00003032
1.2	0.00003372	0.00005289	0.00007815	0.00008562	0.00006446	0.00004573	0.00003552
1.4	0.00003852	0.00006014	0.00008844	0.00009715	0.00007317	0.00005215	0.00004057
1.6	0.00004319	0.00006715	0.00009836	0.0001083	0.00008159	0.00005841	0.00004547
1.8	0.00004774	0.00007396	0.000108	0.0001192	0.00008976	0.00006453	0.00005026
2.0	0.00005218	0.00008061	0.0001173	0.0001298	0.00009771	0.00007051	0.00005494
2.2	0.00005653	0.00008709	0.0001264	0.0001402	0.0001055	0.00007639	0.00005952
2.4	0.0000608	0.00009344	0.0001352	0.0001504	0.000113	0.00008216	0.00006401
2.6	0.00006499	0.00009966	0.0001439	0.0001604	0.0001205	0.00008785	0.00006843
2.8	0.00006911	0.0001058	0.0001523	0.0001702	0.0001277	0.00009345	0.00007278
3.0	0.00007317	0.0001118	0.0001606	0.0001799	0.0001349	0.00009899	0.00007706
3.2	0.00007716	0.0001177	0.0001688	0.0001894	0.0001419	0.0001044	0.00008128
3.4	0.00008111	0.0001235	0.0001768	0.0001988	0.0001488	0.0001099	0.00008545
3.6	0.00008499	0.0001292	0.0001846	0.0002081	0.0001556	0.0001152	0.00008956
3.8	0.00008883	0.0001348	0.0001924	0.0002173	0.0001623	0.0001205	0.00009362
4.0	0.00009263	0.0001404	0.0002	0.0002263	0.0001689	0.0001257	0.00009764
4.2	0.00009638	0.0001459	0.0002075	0.0002353	0.0001755	0.0001309	0.0001016
4.4	0.0001001	0.0001513	0.0002149	0.0002441	0.0001819	0.0001361	0.0001055
4.6	0.0001038	0.0001567	0.0002222	0.0002529	0.0001883	0.0001412	0.0001094
4.8	0.0001074	0.000162	0.0002294	0.0002616	0.0001945	0.0001463	0.0001133
5.0	0.000111	0.0001673	0.0002365	0.0002702	0.0002008	0.0001513	0.0001171
5.2	0.0001146	0.0001725	0.0002435	0.0002787	0.0002069	0.0001563	0.0001209
5.4	0.0001181	0.0001776	0.0002504	0.0002871	0.000213	0.0001613	0.0001247
5.6	0.0001216	0.0001827	0.0002573	0.0002955	0.000219	0.0001662	0.0001284
5.8	0.0001251	0.0001878	0.0002641	0.0003038	0.0002249	0.0001711	0.0001321
$Q_{int}$ tubos IC (m)	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218
$Q_{tubos}$ IC libre (m)	0.0216749	0.0216122	0.0215359	0.0214962	0.0215751	0.0216289	0.0216679
% $Q_{tubos}$ IC libre	99.43%	99.14%	98.79%	98.61%	98.97%	99.22%	99.39%

La Fig. 9.19 muestra la tendencia del X IC vs.  $t_{op}$  RE.



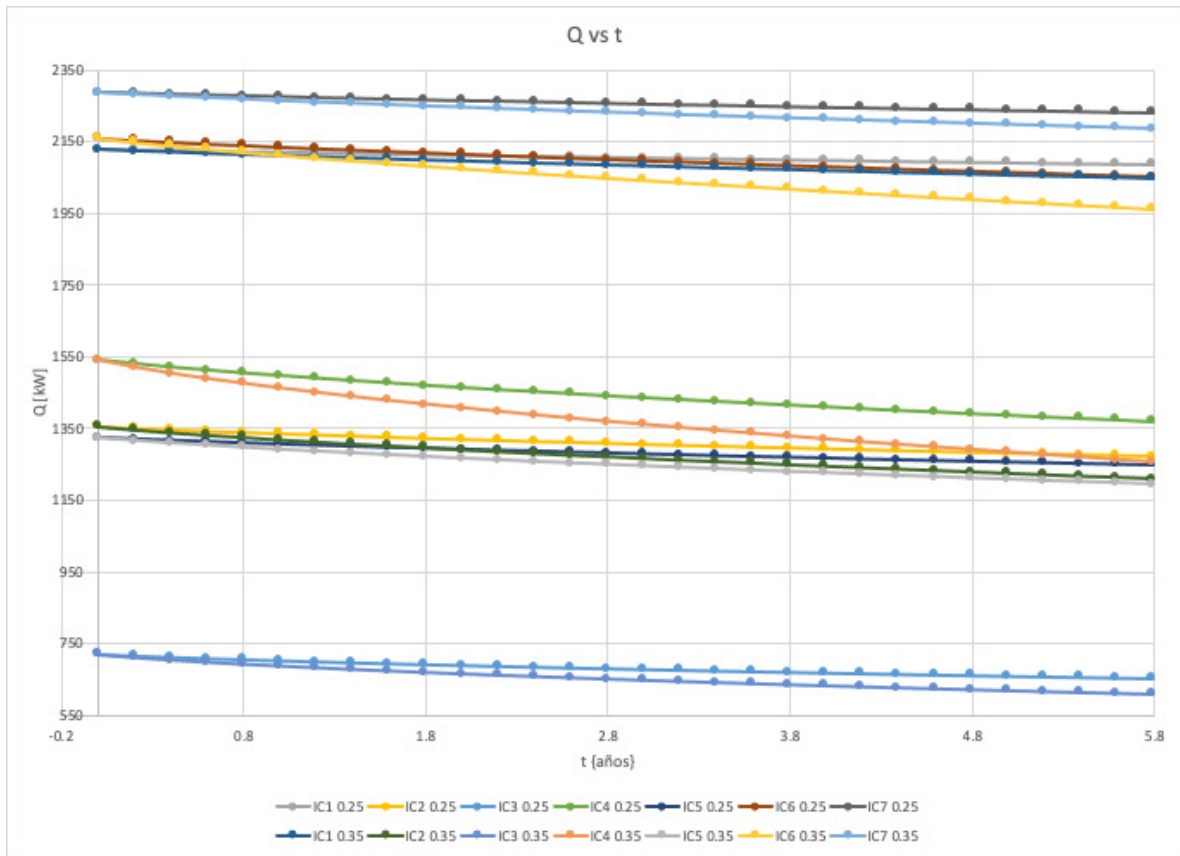
**Fig. 9.19. Grafica de la Tendencia del X IC vs.  $t_{op}$  RE con el Reemplazo de la TE y  $[CaCO_3] = 0.35$  g/L. Caso de Estudio 2**

La Fig. 9.20 muestra la tendencia del X IC con  $[CaCO_3] = 0.25$  y  $0.35$  g/L vs.  $t_{op}$  RE.



**Fig. 9.20. Grafica de la Tendencia del X IC con  $[CaCO_3] = 0.25$  y  $0.35$  g/L vs.  $t_{op}$  RE con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**

La Fig. 9.21 muestra la tendencia de la Q con  $[CaCO_3] = 0.25$  y  $0.35$  g/L vs.  $t_{op}$  RE.



**Fig. 9.20. Grafica de la Tendencia de la Q con  $[CaCO_3] = 0.25$  y  $0.35$  g/L vs.  $t_{op}$  RE con el Reemplazo de la TE. Caso de Estudio 2**



### 9.3. Evaluación Técnico-Económica

La **Tabla 9.13** muestra la evaluación técnico-económica de las soluciones propuestas al problema generado al aumentar las  $m_H$  en un 10%.

**Tabla 9.13. Evaluación Técnico-Económica de las Soluciones Propuestas. Caso de Estudio 2**

<b>Evaluación Técnico Económica del Sistema Zrio. De Enfriamiento (Tlourtric &lt; 50C)</b>				
<b>Equipo</b>	<b>Unidades</b>	<b>EA</b>	<b>Chiller para Agua</b>	<b>Torre de Enfto.</b>
<b>Marca</b>		<b>Evapco</b>	<b>Trane</b>	<b>Marley</b>
<b>Modelo</b>			<b>350 STD</b>	<b>17 kW</b>
<b>Precio Unitario</b>	kusd		\$ 313.1	85
<b>Cantidad de Equipos</b>			3	1
<b>Precio Equipos</b>	kusd		\$ 939	\$ 85
<b>Costo Reubicación IC</b>	kusd		8.91	8.91
<b>Costo By Passes</b>	kusd		1.05	0
<b>Costo Bomba Adicional</b>	kusd		5.94	\$ 15.00
<b>Costo Total</b>	kusd		<b>\$ 955.3</b>	<b>\$ 108.9</b>
<b>Consumo Adicional de Electricidad</b>	kW h/mes		936,217	28,013
	kusd/mes		\$ 70.77	\$ 2.12
<b>Consumo Adicional de Agua</b>	m3/mes	<b>No funciona para este proceso</b>	-\$ 650	4,486.0
	kusd/mes		-\$ 1	\$ 5.24
<b>Gasto Adicional de Servicios</b>	kusd/mes		\$ 70.0	<b>\$ 7.4</b>
<b>Comentarios</b>				
<p><b>La opción mas viable económicamente es el reemplazo de la TE, su desventaja es que consumiría mayor cantidad de agua quedaría expeditado a la disponibilidad de la misma.</b></p>				

# Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo, se evaluó la integración de **EA** y **CA**, así como el reemplazo de la **TE** por una de mayor capacidad a una **RE** que está operando al:

- a) Límite de su capacidad de diseño.
- b) Fuera de su capacidad de diseño al aumentar  $m_H$  en **10%**.

## Conclusiones Generales:

1. El uso de **CA** y/o el reemplazo de la **TE** por una de mayor capacidad en una **RE** que está operando al límite de su capacidad de diseño disminuye las  $T_{Lout\ IC}$  y de la **RIC**, lo anterior disminuye el incrustamiento de los equipos de intercambio de calor. Esto alarga la frecuencia de la limpieza, disminuye el gasto de mantenimiento y evita el daño de los equipos por problemas derivados de la incrustación.
2. El uso de **EA** en una **RE** en el lado **AE** no resulta favorable para disminuir la las  $T_{Lout\ IC}$  y de la **RIC**.
3. Al disminuir la  $T_{Lout\ RIC}$  debido a la incrustación, decrece también la **Q** y la producción de los procesos industriales que involucran intercambio de calor.
4. La  $T_{Hout\ IC}$  se incrementa y la **Q** decrece con mayor rapidez a una **[CaCO<sub>3</sub>]** mayor vs. una menor.

## Conclusiones Particulares:

Para los casos de estudios que se analizaron, las conclusiones principales son las siguientes:

1. La integración de **EA** no disminuye la  $T_{Lout\ RIC} < 50^\circ\text{C}$ , por lo tanto, no cumple con los requerimientos del proceso.
2. La integración de **3 Chiller de Agua (CA)** cumple con los requerimientos del proceso ya que reduce todas la  $T_{Lout\ IC} < 50^\circ\text{C}$  y las  $T_{Hout\ CH}$ . Es la opción con el mayor monto de inversión y gasto de consumo de servicios adicionales. Esta opción aplicaría si existen restricciones importantes en la disponibilidad de agua de repuesto en el sitio en donde está alojada la **RE**. Los  $t_{op}$  son considerables para la programación de la limpieza de los **IC**. El **IC** cuya operación salga de parámetros se pueden realizar su limpieza ya que posee válvulas de bloqueo y control de flujo en el lado **AE**. El **IC-4** y el **IC-6** salen más rápido de parámetros debido a que se

- enfriaron más al  $t=0$ . Los tiempos de operación sin requerir limpieza son más largos. La **caída de presión** se incrementa levemente en **2.3 kPa** y la  $T_{Lout}$  **RIC** disminuye **1.42°C** en **5.7 años**.
3. El reemplazo de la **TE** cumple también con los requerimientos del proceso. Es la opción con el menor monto de inversión y menor gasto de consumo de servicios adicionales. Esta opción aplica si no existen restricciones importantes en la disponibilidad de agua de repuesto en el sitio en donde está alojada la **RE**. Los  $t_{op}$  sin requerir limpieza son más cortos vs. Integración de **CA** al obtener una  $T_{Lout}$  **RIC** más alta. La **caída de presión** se incrementa en **5.2 kPa** y la  $T_{Lout}$  **RIC** disminuye **1.58°C** en **5.7 años**.
  4. La  $T_{Hout}$  **IC** se incrementa y la **Q** decrece con mayor rapidez a una  $[CaCO_3] = 0.35$  g/L vs.  $[CaCO_3] = 0.25$  g/L.

***Trabajo Futuro:***

1. Evaluar los efectos termo-hidráulicos y costo de la **RE** por el uso de **nano fluidos** en el **AE** o salmuera en lugar de **AE**.
2. Evaluar los efectos termo-hidráulicos y costo de la **RE** si se enfría la  $C_H$  con un **Sistema de Enfriamiento Secundario (SES)**.
3. Evaluar el uso de una **TE** invertida (**TEI**) vs. **FCTI**, la **TEI** reduce las emisiones de un **40** a **82%** [16].

# Capítulo 10

# Capítulo 10

## Referencias Bibliográficas

Boyling J. B., 1979. A short proof of the Pi theorem of dimensional analysis. Journal Appl. Math Phys. 4: 531-3.

Dehaghani, S. T., Ahmadikia, H., 2017. Retrofit of a wet cooling tower to reduce water and fan power consumption using a wet/dry approach. Applied Thermal Engineering Journal. 125, 1002-1014.

Francisco, S. F., Pessoa, F. L., Queiroz, E. M., 2021. Cooling water sources diagram, Applied Thermal Engineering Journal. 185, 116329, 1-31

Green, D. W. 2019. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 9th Edition. McGraw Hill. USA. 2128-2315

Hasson D. et al. 1968. Mechanism of calcium carbonate deposition on heat transfer surfaces. Ind Eng Chem Fundam; 7(1): 59-65.

Luceño, J. A., Martín, M. 2018. Optimal design of aging systems: A-frame coolers design under fouling. Computers and Chemical Engineering Journal. 122, 47-58.

Ludwig E. E. 1997. Packed Towers. Chapter 9. Applied Process Design for Chemical & Petrochemical Plants. Pags. 380-415. [https://doi.org/10.1016/S1874-8635\(97\)80005-2](https://doi.org/10.1016/S1874-8635(97)80005-2)

Lugo-Granados, Picon-Nunez. 2020. Comprehensive analysis of the thermohydraulic performance of cooling networks subject to fouling and undergoing retrofit projects. Energy & Environmental Journal. 0(0), 1-23.

Lugo-Granados, Picón-Núñez. 2018. Modelling scaling growth in heat transfer surfaces and its application on the design of heat exchangers. Energy Journal. 160, 845-854.

Ma, J., Wang, Y., Feng, X., Xu, D., 2017. Synthesis cooling water system with air cooler. Chemical Engineering Research & Design. 131, 643-655

Mashaf A. K., Alaskaree E. H. 2020. Prediction of outlet water temperature from cooling towers. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 745 012078. doi:10.1088/1757-899X/745/1/012078

Melgaco, C. C., Pereira, J. L., Silveira, V. 2019. Dynamic operating conditions strategy for water hybrid cooling under variable heating demand. Applied Energy Journal. 237, 635-645.

Paakkonen TM. Modeling CaCO<sub>3</sub> crystallization fouling on a heat exchanger surface-definition of fouling layer properties and model parameters. Int J Heat Mass Tran 2015; 83:84-98.

Picón 2007. Simplified model for the determination of the steady state response of cooling systems. Applied Thermal Engineering. 27(2007) 1173-1181.

Rahmani, K., 2017. Reducing water consumption by increasing the cycles of concentration and Considerations of corrosion and scaling in a cooling system. Applied Thermal Engineering Journal. 114, 849-856.

Ruiz, J., Navarro, P., Hernández, M., Lucas, M., Kaiser, A.S., 2022. Thermal performance and emissions analysis of a new cooling tower prototype. Applied Thermal Engineering Journal. 206, 118065, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118065>

Shi-qi, L., Jin-chun, S., Cong, Y., Ning, Y., Qiu-jun, H., 2021. Optimisation, retrofitting, and variable condition analysis of cooling water networks with improved intermediate main configurations. Applied Thermal Engineering Journal. 183, 116226, 1-15.

Sinnott, R. K. Chemical Engineering Design. Volume 6. 4th Edition. Elsevier. 2005. USA. 202-220.

Symister, O. J. An Analysis of Capital Cost Estimation Techniques for Chemical Processing. Thesis of Master Science in Chemical Engineering. Florida Institute of Technology. 2016. Florida. 5-15, 23-27.

# Material Bibliográfico Complementario

- [1] Evapco, Dry Cooling Manufacturer. Closed Circuit Coolers. Technical Flyer. 2022
- [2] Trane. Catálogo de Productos. Modelo RTAC, Enfriadora de Líquido Tipo Tornillo Enfriada por Aire. 2016. 15, 19, 21, 33. <http://trane-chiller.com>
- [3] Refrigerantes. Capítulo 12. 136-163.
- [4] Chemours. Freon 134<sup>a</sup> Properties, Uses, Storage, and Handling. 2016
- [5] Florida Power & Light Company. Air-Cooled Chillers Manufacturer. 2022. [www.FPL.com](http://www.FPL.com)

# Nomenclatura

<b>A<sub>1c</sub></b>	Área de 1 celda de la TE
<b>A<sub>1cE</sub></b>	Área de 1 célula de la TE
<b>A<sub>c</sub></b>	Área para intercambio de calor
<b>AE</b>	Agua de enfriamiento
<b>A<sub>es</sub></b>	Área externa total del serpentín de cada EA.
<b>A<sub>et</sub></b>	Área externa total de los serpentines
<b>A<sub>e1t</sub></b>	Área externa de 1 tubo
<b>A<sub>F</sub></b>	Área de flujo.
<b>A<sub>F1T</sub></b>	Área de flujo de 1 tubo.
<b>A<sub>FC</sub></b>	Área de flujo corregida de la TE.
<b>A<sub>fla</sub></b>	Área de flujo libre del lado aire de cada EA.
<b>A<sub>p</sub></b>	Ancho del paquete del EA
<b>A<sub>paso</sub></b>	Área de cada paso
<b>A<sub>r</sub></b>	Agua de repuesto de la TE.
<b>A<sub>s</sub></b>	Área de flujo cruzado de la coraza
<b>A<sub>sc</sub></b>	Ancho del serpentín
<b>A<sub>TCE</sub></b>	Área total de las células de la TE
<b>BHP</b>	Potencia calculada de los ventiladores de la TE
<b>BHP<sub>nc</sub></b>	Potencia calculada de cada ventilador de la TE
<b>BHPA<sub>TCE</sub></b>	Potencia calculada de los ventiladores por área total de las células de la TE.
<b>C<sub>1</sub></b>	Concentración de Ca <sup>2+</sup>
<b>C<sub>2</sub></b>	Concentración de CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
<b>C<sub>a</sub></b>	Costo de los ahorros anuales
<b>C<sub>AM</sub></b>	Costo mensual del agua potable
<b>C<sub>CaCO3</sub></b>	Concentración de CaCO <sub>3</sub> en el agua de repuesto de la TE
<b>C<sub>b</sub></b>	Corte del bafle
<b>C<sub>c</sub></b>	Corriente fría
<b>C<sub>co</sub></b>	Ciclos de concentración del agua de la TE
<b>C<sub>E</sub></b>	Cantidad de equipos.
<b>C<sub>EA</sub></b>	Cantidad de EA
<b>C<sub>EI</sub></b>	Costo estimado unitario de instalación.
<b>C<sub>UEA</sub></b>	Precio unitario del enfriador de aire
<b>C<sub>EM</sub></b>	Costo mensual de la electricidad.
<b>C<sub>EMVTE</sub></b>	Consumo mensual del consumo de electricidad del ventilador de la TE
<b>C<sub>ETP</sub></b>	Costo estimado total del proyecto



<b>C<sub>H</sub></b>	Corriente Caliente
<b>C<sub>IC</sub></b>	Costo del IC.
<b>C<sub>mCaCO3</sub></b>	Concentración máx. de CaCO <sub>3</sub> en el agua recirculada de la RE
<b>C<sub>me</sub></b>	Consumo mensual de electricidad
<b>C<sub>NR</sub></b>	Cantidad de celdas requeridas de la TE.
<b>C<sub>NRc</sub></b>	Cantidad de celdas requeridas corregidas de la TE.
<b>CI</b>	Claro entre el diámetro del haz de tubos y el diámetro interno de la coraza
<b>C<sub>p</sub>r</b>	Capacidad calorífica del refrigerante a la T de operación
<b>C<sub>p</sub>Lp</b>	Capacidad calorífica promedio del Agua de enfriamiento
<b>C<sub>T</sub></b>	Costo total de los equipos.
<b>C<sub>TI</sub></b>	Costo total de instalación
<b>C<sub>trbi</sub></b>	Cabeza total requerida por la bomba
<b>C<sub>r</sub></b>	Coefficiente de remosion de sales.
<b>C<sub>s</sub></b>	Numero de serpentines
<b>C<sub>v</sub></b>	Cabeza de velocidad
<b>D<sub>AB</sub></b>	Difusividad de A en B
<b>D<sub>b</sub></b>	diámetro del haz de tubos
<b>d<sub>e</sub></b>	diámetro equivalente
<b>D<sub>L</sub></b>	Perdida de agua por arrastre en la <b>TE</b> .
<b>dP</b>	Caída de presión
<b>dP<sub>a</sub></b>	Caída de presión del aire
<b>dP<sub>e</sub></b>	Caída de presión del empaque de la <b>TE</b>
<b>dP<sub>en</sub></b>	Caída de presión del empaque por long. De altura empacada de la <b>TE</b>
<b>dP<sub>L</sub></b>	Caída de presión a través de los Louvers de la <b>TE</b>
<b>dP<sub>TRE</sub></b>	Caída de presión total de la <b>RE</b>
<b>dP<sub>TRES</sub></b>	Caída de presión total de la <b>RE</b> con <b>SES</b>
<b>dP<sub>RIC</sub></b>	Caída de presión de la <b>RIC</b>
<b>dP<sub>s</sub></b>	Diferencia de presión en el sistema.
<b>dP<sub>mt</sub></b>	Caída de presión máxima tolerada
<b>dP<sub>t</sub></b>	Caída de presión en los tubos.
<b>dP<sub>TTE</sub></b>	Caída de presión total de la <b>TE</b>
<b>dP<sub>TUSS</sub></b>	Caída de presión total del EA y sus tuberías y válvulas de conexión a la RE.
<b>D<sub>s</sub></b>	diámetro interno de la coraza
<b>dT<sub>ain</sub></b>	Diferencial de temperatura a la entrada al equipo de IC.
<b>dT<sub>aout</sub></b>	Diferencial de temperatura a la salida al equipo de IC.
<b>E</b>	Energía de activación
<b>Evap</b>	Agua evaporada en la TE.
<b>f</b>	Factor de fricción.

<b>F<sub>t</sub></b>	Factor de corrección de la $\Delta T_{ML}$
<b>G<sub>a</sub></b>	Velocidad másica del aire por área de flujo.
<b>G<sub>ac</sub></b>	Velocidad másica corregida del aire por área de flujo.
<b>G<sub>avi</sub></b>	Flujo volumétrico de aire a la entrada de la TE.
<b>G<sub>E</sub></b>	Perdida de presión equivalente del flujo masico de aire
<b>G<sub>EA</sub></b>	Flujo volumétrico de aire a la entrada de cada EA.
<b>G<sub>AMTE</sub></b>	Gasto mensual de agua de repuesto de la TE
<b>G<sub>em</sub></b>	Gasto mensual de electricidad
<b>G<sub>EMVTE</sub></b>	Gasto mensual de electricidad del ventilador de la TE
<b>G<sub>max</sub></b>	Velocidad másica máx. del aire por área de flujo.
<b>g<sub>r</sub></b>	Aceleración de la gravedad
<b>G<sub>s</sub></b>	Flujo masico del gas
<b>h<sub>a</sub></b>	Coefficiente de transferencia de calor del lado aire
<b>h<sub>c</sub></b>	Coefficiente de transferencia de calor del lado coraza
<b>H<sub>EA</sub></b>	Altura inclinada del EA
<b>h<sub>i</sub></b>	Coefficiente de transferencia de calor de los tubos.
<b>h<sub>ic</sub></b>	Coefficiente de transferencia de calor del lado caliente
<b>h<sub>if</sub></b>	Coefficiente de transferencia de calor del lado frio.
<b>h<sub>s</sub></b>	Coefficiente de transferencia de calor lado coraza
<b>H<sub>om</sub></b>	Horas de operación por mes
<b>IC</b>	Intercambiador de calor
<b>j<sub>h</sub></b>	Factor de transferencia de calor
<b>j<sub>f</sub></b>	Factor de fricción
<b>k</b>	No. De cabezas de velocidad
<b>K</b>	Resistencia al flujo
<b>K<sub>Bi</sub></b>	Resistencia al flujo a través de un ramal
<b>K<sub>i+j</sub></b>	Resistencia al flujo a través del ramal i y j
<b>k<sub>Lp</sub></b>	Conductividad térmica promedio del <b>AE</b>
<b>K<sub>r</sub></b>	Coefficiente de reacción.
<b>K<sub>sp</sub></b>	Constante de solubilidad del CaCO <sub>3</sub>
<b>K<sub>t</sub></b>	Resistencia al flujo en una tubería recta
<b>K<sub>whpa</sub></b>	Potencia requerida por la bomba adicional de la RE
<b>K<sub>whp</sub></b>	Potencia requerida por la bomba de la RE
<b>K<sub>whpi</sub></b>	Potencia inicial requerida por la bomba de la TE
<b>K<sub>0</sub></b>	Constante de reacción.
<b>L<sub>a</sub></b>	Velocidad másica del agua de enfriamiento por área de flujo.
<b>L<sub>ac</sub></b>	Velocidad másica corregida del agua de enfriamiento por área de flujo.
<b>L<sub>b</sub></b>	Espacio entre bafles

<b>L<sub>m</sub></b>	Flujo masico del Agua de enfriamiento
<b>L<sub>EA</sub></b>	Flujo masico del Agua de enfriamiento de cada EA
<b>L<sub>rs</sub></b>	Flujo volumétrico de refrigerante de cada serpentín
<b>L<sub>s</sub></b>	Long. total del serpentín
<b>L<sub>t</sub></b>	Long. De la tubería
<b>L<sub>tp</sub></b>	Long. De tubo por cada paquete de cada EA
<b>L<sub>v</sub></b>	Flujo Volumétrico
<b>L<sub>v i+j</sub></b>	Flujo Volumétrico de i + j
<b>L<sub>VEA</sub></b>	Flujo volumétrico del Agua de enfriamiento de cada EA
<b>m<sub>d</sub></b>	Velocidad de deposición de masa
<b>m<sub>H</sub></b>	Flujo masico de la CC
<b>m<sub>r</sub></b>	Velocidad de remoción de masa
<b>N</b>	Número de pisos de la TE
<b>N<sub>CE</sub></b>	Numero de células de la TE
<b>N<sub>CEC</sub></b>	Numero de células corregidas de la TE
<b>N<sub>cv</sub></b>	Numero de cabezas de velocidad
<b>N<sub>i</sub></b>	Numero de incrementos de la TE.
<b>N<sub>pc</sub></b>	Numero de pasos por la coraza
<b>N<sub>pt</sub></b>	Numero de pasos por los tubos.
<b>N<sub>t</sub></b>	Numero de tubos
<b>N<sub>tp1</sub></b>	Numero de tubos por paso
<b>N<sub>PR</sub></b>	Numero de pasos por renglón del serpentín del EA.
<b>N<sub>RS</sub></b>	Numero de renglones por serpentín del EA.
<b>N<sub>SEA</sub></b>	Numero de serpentines por EA
<b>N<sub>RC</sub></b>	Numero de serpentines por paquete de cada EA
<b>N<sub>rco</sub></b>	Numero de reducciones concéntricas
<b>NTU</b>	Numero de unidades de transferencia.
<b>Nu<sub>t</sub></b>	No. De Nusselts en los tubos
<b>N<sub>v</sub></b>	Cantidad de ventiladores de cada EA.
<b>N<sub>va</sub></b>	Cantidad de válvulas
<b>P<sub>b</sub></b>	Presión barométrica
<b>P<sub>c</sub></b>	Perdida de cabeza
<b>P<sub>ev</sub></b>	Presión del evaporador
<b>P<sub>fcT</sub></b>	Potencia de los ventiladores de aire del EA
<b>P<sub>rc</sub></b>	No. De Prandtl en la coraza
<b>P<sub>rt</sub></b>	No. De Prandtl en los tubos.
<b>P<sub>it</sub></b>	Pitch entre tubos
<b>P<sub>t</sub></b>	Presión total

<b>Q</b>	Carga térmica
<b>Q<sub>EA</sub></b>	Carga térmica intercambiada de los EA.
<b>Q<sub>EA</sub>C</b>	Carga térmica intercambiada corregida de los EA.
<b>Q<sub>I</sub></b>	Carga térmica intercambiada
<b>Q<sub>IE</sub></b>	Carga térmica intercambiada por el evaporador
<b>Q<sub>IC</sub></b>	Carga térmica intercambiada corregida
<b>Q<sub>N</sub></b>	Capacidad térmica nominal
<b>R</b>	Constante de los gases.
<b>R<sub>c</sub></b>	Carga másica de refrigerante
<b>Re<sub>s</sub></b>	No. De Reynolds en la coraza
<b>Re<sub>t</sub></b>	No. De Reynolds en los tubos
<b>R<sub>fc</sub></b>	Factor de ensuciamiento del lado caliente
<b>R<sub>ff</sub></b>	Factor de ensuciamiento del lado frío
<b>RIC</b>	Red de intercambio de calor
<b>R<sub>r</sub></b>	Rugosidad relativa
<b>R<sub>s</sub></b>	Factor de ensuciamiento
<b>R<sub>st</sub></b>	Resistencia térmica a un determinado tiempo.
<b>R<sub>t</sub></b>	Rugosidad de la tubería
<b>R<sub>tf</sub></b>	Flujo masico de refrigerante
<b>R<sub>tfs</sub></b>	Flujo masico de refrigerante de cada serpentín
<b>R<sub>tp</sub></b>	No. De renglones de tubo por paquete del EA.
<b>Sc</b>	No. De Schmidt
<b>SES</b>	Sistema secundario de enfriamiento
<b>Sh</b>	No. De Sherwood
<b>t</b>	Tiempo
<b>T<sub>BH</sub></b>	Temperatura de bulbo húmedo
<b>T<sub>BS</sub></b>	Temperatura de bulbo seco
<b>T<sub>cin</sub></b>	Temperatura de entrada de la C <sub>c</sub>
<b>T<sub>cout</sub></b>	Temperatura de salida de la C <sub>c</sub>
<b>t<sub>f</sub></b>	Tiempo final
<b>T<sub>gp</sub></b>	Temperatura promedio del aire
<b>T<sub>gin</sub></b>	Temperatura de salida del Aire
<b>T<sub>gout</sub></b>	Temperatura de salida del Aire
<b>T<sub>Hin</sub></b>	Temperatura de entrada de la C <sub>H</sub>
<b>T<sub>Hout</sub></b>	Temperatura de salida de la C <sub>H</sub>
<b>T<sub>i</sub></b>	Temperatura de la interfase solido-liquido
<b>t<sub>i</sub></b>	Tiempo inicial
<b>T<sub>Lin</sub></b>	Temperatura de entrada del <b>AE</b>

$T_{Lout}$	Temperatura de salida del <b>AE</b>
$T_{LP}$	Temperatura promedio del <b>AE</b>
$t_{op}$	Tiempo de operación
$T_p$	Temperatura promedio
$T_{rco}$	Temperatura del refrigerante en el condensador
$T_w$	Temperatura de la pared
$\bar{u}$	Velocidad promedio
$u_s$	Velocidad del fluido en la coraza
$u_{rt}$	Velocidad del refrigerante en los tubos
$u_t$	Velocidad del fluido en los tubos
$u_{it}$	Velocidad inicial del fluido en los tubos
$U_i$	Coefficiente global inicial de transferencia de calor.
$U_o$	Coefficiente global de transferencia de calor basado en el área externa del tubo.
$V$	Flujo Volumétrico
$V_{am}$	Flujo Volumétrico de aire del EA
$V_{CL}$	Velocidad de Cara del Aire en la entrada al Louver
$V_f$	Velocidad de cara
$V_{fn}$	Velocidad de cara corregida
$V_s$	Volumen Total del serpentín de cada EA
$W_{bi}$	Trabajo realizado por la bomba
$Z$	Altura empacada de la TE
$X_i$	Espesor de masa depositada
$X_{f,t}$	Espesor de masa depositada a un determinado tiempo.
$\%dP_E$	Porcentaje de la $dP_E$ vs. $dP_{ETT}$

#### Letras Griegas:

$\alpha$	Factor empírico
$\beta$	Coefficiente de transferencia de masa
$\phi_i$	diámetro interno del tubo
$\phi_o$	diámetro externo del tubo
$\Delta H_{vr}$	Entalpia de vaporización
$\Delta T_M$	$\Delta T_{ML}$ corregida
$\Delta T_{ML}$	Diferencia de temperatura media logarítmica
$\Delta z$	Diferencia en elevaciones
$\delta$	Espesor de la capa laminar
$\varepsilon_i$	Rugosidad relativa

$\epsilon_{TS}$	Eficiencia Termica Simple
$\lambda_f$	Conductividad térmica de la sal
$\mu_c$	Viscosidad absoluta promedio del fluido caliente
$\mu_{AE}$	Viscosidad absoluta promedio del <b>AE</b>
$\mu_i$	Viscosidad absoluta del refrigerante a la temperatura de operación
$\mu_w$	Viscosidad absoluta a la temperatura de pared.
$\eta_B$	Eficiencia de la bomba
$\eta_v$	Eficiencia del ventilador
$\Psi$	Factor de resistencia a la depositacion
$\rho_c$	Densidad del fluido caliente
$\rho_{GEA}$	Densidad del Aire a la temperatura de entrada del EA
$\rho_{AE}$	Densidad promedio del <b>AE</b>
$\rho_f$	Densidad de la sal
$\rho_{GI}$	Densidad del Aire a la temperatura de entrada de la TE
$\rho_{GP}$	Densidad del Aire promedio de la TE
$\rho_r$	Densidad del refrigerante a la temperatura de operación
$\tau$	Esfuerzo cortante

# Capítulo 11

# Capítulo 11.

## Apéndices. Programas en EES.

### Apéndice 1.

#### *Programa en EES para el Diseño y Simulación de una TE*

"Programa para el Diseño y Rating de una Torre de Enfriamiento"

"Condicionales"

```
function abc(X)
if (x>19.4) then CALL warning ('Modifique las Temperaturas de Entrada y Salida a la TE',X)
abc:=x
end
function abd(X1)
if (x1<3) then CALL warning ('El Acecamiento es < 3 °C, Modifique las Temperatura de Salida de la TE',X1)
abd:=x1
end
function abe(X2)
if (x2>75) then CALL warning ('Modifique la Cantidad de Células y el Arreglo de Celdas de la TE',X2)
abe:=x2
end
```

"Datos de la Cd. de Guanajuato"

Pb=764.25 [mmHg]

{Tbhmm=20[°C]}

Tbhm=Tbhmm

Tbhi=1.8\*Tbhm+32

{Tbsmm=36.9 [°C]}

Tbsm=Tbsmm

Tbsi=1.8\*Tbsm+32

{Diam=31}

Diam=Días "Días de Operación por mes"

"Datos del Agua de Enfriamiento"

L\_vor=0.232 [m3/s] "Flujo de agua original"

{Lvo=0.43 [m3/s]} "Flujo de agua modificado"



$L_{vo}=L_{v0}$   
 $dL_v=-L_{vor}+L_{vo}$  "Diferencial de flujo"  
 $dL_m=dL_v*\rho_{pi}$  "Diferencial de flujo masico"  
 $L_{mc}=L_{v0}*\rho_{pi}$  "Flujo"  
 $T_{lin}=58.82[^\circ C]$  "Datos del Caso 1 Original"  
 $T_{lout}=33 [^\circ C]$   
 $T_{pi}=(T_{lin}+T_{lout})/2$  "T prom inicial"  
 $\rho_{pi}=-0.0039*T_{pi}^2-0.0505*T_{pi}+1000.4$   
 $Q_p=L_{mc}*C_i*(T_{lin}-T_{lout})$   
 $C_i=4.18 [kJ/kg^\circ C]$   
 "Temperaturas Corregidas Iniciales"  
 $T_{linc}=48.48 [^\circ]$   
 $T_{loutc}=28.48 [^\circ]$   
 $T_{lind}=50.4 [^\circ C]$   
 "Datos del Aire"  
 $\rho_f=1.224 [kg/m^3]$   
 "Cálculo del Rango y Acercamiento"  
 $Rango= T_{linc}-T_{fout}$   
 $Acercamiento=T_{lout}-T_{bhm}$   
 $x=abc(Rangomax)$  "Condicionales"  
 $x1=abd(Acercamientoc)$   
 $Rangomax=19.4 [^\circ C]$   
 $Acercamientomax=11 [^\circ C]$   
 $T_{loutc}=Acercamientomax + T_{bhm}$  "Temp. de Salida del Agua Ajustada"  
 $\{T_{linc}=48.17 [^\circ]\}$  "Condición para Rating"  
 $T_{linm}=T_{linc}$   
 $Rangoc=T_{linc}-T_{fout}$  "Rango corregido"  
 $Rangoci=Rangoc*1.8+32$   
 $Acercamientoc=T_{fout}-T_{bhm}$   
 "Calculo Tprom del Agua de Enfto."  
 $T_{prom}=(T_{linc}+T_{fout})/2$   
 "Calculo densidad a la Tprom"  
 $\rho_{prom}=-0.0039*T_{prom}^2-0.0505*T_{prom}+1000.4$   
 "Calculo Flujo Masico de Agua"  
 $L_{mi}=L_{mc}*\text{convert}(kg/s, lb\_m/hr)$   
 $L_{vc}=L_{mc}/\rho_{prom}$  "Flujo volumétrico de agua corregido"  
 $L_{vci}=L_{vc}*\text{convert}(m^3/s, gpm)$   
 "Cálculo de Gs. Rango de L/G es de 0.75 a 1.5. Se considera L/G = 0.876"

{ReLG=0.876}

RLG=ReLG

Gs=Lmc/(RLG) "Flujo masico de aire corregido"

Gsi=Gs\*convert (kg/s, lb\_m/hr)

"Numero de Incrementos (N)"

{Ni=20}

N=Ni

"Calculo NTU"

NTU=4.19\*N\*Lmc\*(Tlind-Tloutc)/(0.000151786\*Tloutc^3+(0.000556552\*Tlind-0.00641385)\*Tloutc^2+(1.1556-0.01476783\*Tlind+0.00068023\*Tlind^2)\*Tloutc+0.00027713\*Tlind^3-0.009024785\*Tlind^2+1.4124\*Tlind-2.568\*Tbhm+0.029834\*tbhm^2-0.0016657\*Tbhm^3-2.095\*(N+1)\*RLG\*(Tlind-Tloutc))

{NTU=-637.2}

"Cálculo de la T<sub>Lout</sub>"

{T<sub>2out</sub>=30.96[°]}

T<sub>fout</sub>=T<sub>2out</sub>

0.000151786\*T<sub>2out</sub>^3+(0.000556552\*Tlinc-0.006041385)\*T<sub>2out</sub>^2+(1.1556-0.01476783\*Tlinc+0.00068023\*Tlinc^2+2.095\*(N+1)\*RLG+4.19\*N\*Lmc/NTU)\*T<sub>2out</sub>+0.00027713\*Tlinc^3-0.009024785\*Tlinc^2+(1.4124-2.095\*(N+1)\*RLG-4.19\*N\*Lmc/NTU)\*Tlinc-2.568\*Tbhm+0.029834\*Tbhm^2-0.0016657\*Tbhm^3=y

"Cálculo de la Altura de la TE (ZT)"

"Cálculo del No. de Pisos (N<sub>p</sub>) con la Correlación de Kelly-Swenson"

"Empaque tipo A"

A=0.06

n<sub>1</sub>=0.62

S=9 [in]

B=0.34/100000000

C=0.11/1000000000000

S<sub>f</sub>=3 [ft]

N<sub>p</sub>=-NTU/((A\*RLG)^(-n<sub>1</sub>))-0.07

ZT=N<sub>p</sub>\*S\*2.54/100 "Altura de la TE m"

Z=ZT\*convert (m, ft)

"Calculo del Área de Flujo de la TE (A<sub>f</sub>)"

G<sub>a</sub>=1400 [lb/h\*ft<sup>2</sup>]

L<sub>a</sub>=G<sub>a</sub>\*RLG

A<sub>f</sub>=G<sub>si</sub>/G<sub>a</sub>

LC=6 [ft] "Lado Comercial de la Celda"

$A1C=LC^2$  "Área de 1 Celda"  
 $CN=Af/A1C$  "Celdas Requeridas"  
 $CNR=CN+.72$   
 $Afc=CNR*A1C$  "Área de Flujo Corregida"  
 $NC=4$  "Numero de Células"  
 "Combinación de Célula de 6 x 6 celdas"  
 $Nrc=4$  "No. de Renglones de Celdas"  
 $Ncc=3$  "No. de Columnas de Celdas"  
 $A1Ce=A1C*(Nrc*Ncc)$  "Área de 1 Célula"  
 $ATCe=NC*A1Ce$  "Área Total de las Células"  
 $ATCesi=ATCe*convert(ft^2, m^2)$   
 $Lac=Lmi/ATCe$  "Lac Corregida"  
 $Gac=Gsi/ATCe$  "Ga Corregida"  
 "Cálculo del DP de la TE"  
 "dP Empaque"  
 $\{Ge=0.999*Gac+2277$  "dP Equivalente de la Fig. 9-119" $\}$   
 $Ge=3900$   
 $dam=1E-5*Tbsm^2-0.0045*Tbsm+1.2908$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $da=dam*convert(kg/m^3, lbm/ft^3)$  "Densidad Promedio del Aire"  
 $dPe=Np*B*Gac^2*0.0675/da+Np*C*Sf^0.5*Lac*Ge^2*0.0675/da$   
 $dPen=dPe/Z$  "Rango para Flujos Bajos de 0.003 a 0.006 in H<sub>2</sub>O"  
 "dPLouvers"  
 $LI=Nrc*Lc$  "Considerando que se instala el Louver en la cara más larga"  
 $Ld=2$  "Lados"  
 $hl=6$  [ft] "Altura"  
 $Atl=LI*NC*Ld*hl$  "Área Total del Louver"  
 $Gavi=Gsi/(60*da)$  "Flujo de Aire @ la Entrada"  
 $Vcl=Gavi/Atl$  "Velocidad de cara a través de los Louvers"  
 $dPI=0.32-(0.3*(1600-Vcl)/(1600-400))$  "dP a través de los Louvers"  
 "dP Eliminador de Niebla (EN)"  
 $dPeln=0.07-0.06*(2000-Gac)/(2000-800)$  "dp a través del EN"  
 $dPT = dPeln+dpl+dpe$  "dP Total in H<sub>2</sub>O"  
 $dPTp=dPT*249.08$  "Pa"  
 $dPedPT=dPe*100/dPT$   
 "Cálculo de la Potencia de los Motores de los Ventiladores (BHP)"  
 $das=0.067$  [lb/ft<sup>3</sup>] "Densidad del Aire a la salida de TE"  
 $BHP=Gsi*dPT/(das*60*6356*0.5)$   
 $BHPnc=BHP/NC$  "Potencia por Célula"

$x2 = a_{be}(BHP_{nc})$

$BHP_{atc} = BHP / At_{ce}$

### "Balance de Materia para el Agua"

$Evap = 0.0008 * L_{vci} * Rangoci$

$DL = 0.0002 * L_{vci}$  "Perdida de Agua por Arrastre"

$CCA = 250$  [ppm] "Concentración de Cloruros del Agua de Repuesto"

$CCM = 750$  [ppm] "Concentración Max. de Cloruros del Agua en Recirculación"

$CC = CCM / CCA$  "Ciclos de Concentración"

$BL = (Evap - (CC - 1) * DL) / (CC - 1)$  "Purga de Fondo"

$Ar = Evap + DL + BL$  "Agua de Repuesto"

$Arm = Ar * convert$  (gpm, m<sup>3</sup>/h)

$Ar_{md} = Arm * 24$  "dia"

$Ar_{mm} = Ar_{md} * Dias$  "mes"

$Par = 100 * Ar / L_{vci}$  "Porcentaje de agua de repuesto vs. recirculada"

$Ar_0 = 1048$  [gpm] "Consumo de Agua sin SS"

$Ara = Ar_0 - Ar$  "Agua Ahorrada"

$Aram = Ara * convert$ (gpm, m<sup>3</sup>/min)

$Pag = 23.48$  [pesos/m<sup>3</sup>] "Precio del agua en Gto."

$Tc = 20.22$  [pesos/usd]

$Ar_{ad} = Ar_{mm} * Pag$  "Ahorro en pesos por Agua"

$Ar_{adu} = Ar_{ad} * Tc / 1000$  "kUSD"

$T_{loutri} = T_{fout} + Q_p / (C_l * L_{mc})$  "Temperatura de Salida del AE de la RIC"

### "Potencia Original de la Bomba"

$Wb_i = -gr * Z_t - (dP_{ric}) / \rho_{prom}$  "Trabajo realizado"

$C_{trb_i} = (dP_{ric}) / (\rho_{prom} * gr) - (-Z_t)$  "Cabeza total requerida por la bomba"

$K_{wb_i} = -Wb_i * L_{mc} / (\eta * 1000)$  "Potencia de la bomba"

$K_{whp_i} = K_{wb_i} * convert$ (kw, hp)

"dP en Tuberías Interconexión del SSE"

$dEm = 0.564$  [m]

$dE = dEm * 1000$  [mm] "diámetro de la tubería G"

$R_t = 0.046$  [mm] "Rugosidad de la tubería"

$R_r = R_t / dE$  "Rugosidad Relativa"

$\mu_c = Viscosity(water, T = T_{prom}, P = P_b)$

$A_{fE} = 3.1416 * dEm^2 / 4$  "Área de flujo de la tubería E"

$u_t = L_{vc} / A_{fE}$  "Velocidad del agua en la tubería"

$Re = \rho_{prom} * u_t * dEm / \mu_c$

$ff = 0.0013$  "Factor de fricción"

$L_t = 6$  [m] "Long. de la tubería"

$ht=3$  [m] "Altura de la tubería"  
 $Nvc=2$  "Número de válvulas compuerta"  
 $Nch=0$  "Check"  
 $Nrcc=2$  "Redxn concéntricas"  
 $Ntei=0$  "Tee recta entra"  
 $Nteo=1$  "Tee recta sale"  
 $Nc90=1$  "Codo 90°"  
 $gr=9.8$  [m/s<sup>2</sup>] "Aceleración de la gravedad"  
 $dPtu=8*ff*Lt*rho\_prom*ut^2/(dEm*2)$  "dP 1 Tubería"  
 $Kv=0.15$  "Número de cabezas de velocidad Válvula de Compuerta"  
 $Kch=4$   
 $Krc=0.5$  "Redxn Concéntrica"  
 $Ktei=1.8$   
 $Kteo=1.2$   
 $Kc90=0.7$   
 $Ncv=Nvc*Kv+Nrcc*Krc+Ntei*Ktei+Nteo*Kteo+Nc90*Kc90+Nch*Kch$  "Número de cabezas de velocidad total"  
 $Cv=ut^2/(2*gr)$  "Cabeza de velocidad"  
 $Pc=Ncv*Cv*rho\_prom*gr$  "Perdida de cabeza"  
 $Pt=Pc+dPtu$  "Presión total"  
 $\{PtEA=24200$  [Pa]} "Presión Total Tuberías del Enfriador de Aire"  
 $PtEA=PtEA$   
 $dP\_TCT=Pt+PtEA$   
 "dP Red de Intercambio de Calor"  
 $dPric=69790$  [Pa] "Del programa RIC"  
 $dP\_totalRE = dPric$  "dP total de la red de enfriamiento"  
 "Potencia Adicional de Bombeo"  
 $Wb=-gr*Zt-(Pt+PtEA+dPric+dPTp)/rho\_prom$  "Trabajo realizado"  
 $Ctrb=(Pt+PtEA+dPric+dPTp)/(rho\_prom*gr)-(-Zt)$  "Cabeza total requerida por la bomba"  
 $Lvch=Lvc*3600$  "Flujo volumétrico m<sup>3</sup>/h"  
 $eta=0.75$  "Eficiencia de la Bomba @ flujo de operación"  
 $Kwb=-Wb*Lmc/(eta*1000)$  "Potencia de la bomba"  
 $Kwhp=Kwb*convert(kw, hp)$   
 "Potencia y Costo de la BOMBA ADICIONAL"  
 $Kwhpa=Kwhp-Kwhp\_i$  "Potencia de la bomba adicional"  
 $\{Cba=(8600+7310*(dLm*dP\_totalRE/rho\_prom)^.2)/1000$  "Costo estimado de la bomba"  
 $Cbae=300/20.2$  "kUSD"  
 "Costo de Operación de la TE"

$G_v = G_s / \rho_{a_f}$  "Flujo volumétrico del aire de la TE  $m^3/s$ "  
 $G_{vh} = G_v * 3600$  " $m^3/h$ "  
 $kW_v = BHP_{nc} * \text{convert}(hp, kw)$   
 $kW_{vt} = N_c * kW_v$  "Consumo total de los ventiladores"  
 $kW_{vm} = kW_{vt} * \text{Dias} * 24$  " $kW h$ "  
 $kW_{bm} = kW_b * \text{Dias} * 24$  "Consumo de la Bomba  $kW h$ "  
 $kW_t = kW_{vm} + kW_{bm}$  "Consumo total de electricidad de la TE"  
 $C_{ee} = 1.527$  [mxn/usd] "Costo Electricidad Julio 2022"  
 $G_{em} = kW_{vm} * C_{ee} / T_c$  "Gasto Electricidad Mensual"  
 $G_{am} = Ar_{mm} * \text{Pag} / T_c$  "Gasto Agua Mensual"  
 $G_{bm} = kW_{bm} * C_{ee} / T_c$  "Gasto Electricidad Mensual de la Bomba"  
 $G_{tm} = G_{em} + G_{am} + G_{bm}$  "Gasto Total Mensual"  
 "Costo de la TE"  
 $C_{TE} = (11000 + 260 * AT_{Cesi}) / 1000$  "kUSD"

## Apéndice 2.

### Programa en EES para la DFRE.

$V_F = 0.16$  [ $m^3/s$ ] "Flujo de AE total"  
 "Diametro de las tuberías de los ramales"  
 $d_a = 0.13$   
 $d_B = 0.1$   
 $d_c = 0.12$   
 $d_D = 0.13$   
 $d_G = 0.08$   
 $d_F = 0.33$   
 $d_H = 0.1$   
 $d_I = 0.09$   
 $T_{C_i} = 28$  [ $^{\circ}C$ ] "Temperatura del AE de entrada a la RIC"  
 $CaCO_3 = 0.25$  {g/l} "Dureza del Agua de Repuesto"  
 $Factor = 1.1$  "Incremento de Flujo de las Corrientes Calientes"  
 "Flujos masicos de las Corrientes Calientes"  
 $m_{dot\_H1} = 1 * Factor * 50000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H2} = 1 * Factor * 50000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H3} = 1 * Factor * 50000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H4} = Factor * 50000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H5} = 1 * Factor * 50000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H} = 1 * Factor * 50000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H7} = 1 * Factor * 50000 * \text{convert}(s, hr)$   
 "Flujos masicos de las Corrientes Calientes por los by passes"  
 $m_{dot\_H1B} = 0.0 * Factor * 250000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H2B} = 0.0 * Factor * 250000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H3B} = 0.0 * Factor * 250000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H4B} = 0.0 * Factor * 250000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_H5B} = 0.0 * Factor * 250000 * \text{convert}(s, hr)$   
 $m_{dot\_HB} = 0.0 * Factor * 250000 * \text{convert}(s, hr)$

$m\_dot\_H7B=0.0*Factor*250000*convert(s,hr)$   
 "No. de tubos de los IC"  
 $Nt1=320$   
 $Nt2=120$   
 $Nt3=52$   
 $Nt4=80$   
 $Nt5=120$   
 $Nt=120$   
 $Nt7=240$   
 "Diametros de los tubos de los IC"  
 $D\_i\_tubo1=0.0218 [m]$   
 $D\_o\_tubo1=0.025 [m]$   
 $D\_i\_tubo2=0.0218 [m]$   
 $D\_o\_tubo2=0.025 [m]$   
 $D\_i\_tubo3=0.0218 [m]$   
 $D\_o\_tubo3=0.025 [m]$   
 $D\_i\_tubo4=0.0218 [m]$   
 $D\_o\_tubo4=0.025 [m]$   
 $D\_i\_tubo5=0.0218 [m]$   
 $D\_o\_tubo5=0.025 [m]$   
 $D\_i\_tubo7=0.0218 [m]$   
 $D\_o\_tubo7=0.025 [m]$   
 $D\_i\_tubo=0.0218$   
 $D\_o\_tubo=0.025$   
 "No. de Cabezas de Velocidad"  
 "Interconexion de IC"  
 $k\_val=0.15$  "Valvula de compuerta"  
 $k\_rc=0.75$  "Redxn Concentrica"  
 $n\_val=2$  "no. de valvulas"  
 $n\_rc=2$   
 $N\_C=k\_val*n\_val + k\_rc*n\_rc$   
 "Ramal E y F"  
 $k\_c90=0.7$  "Codo 90°"  
 $k\_tee=1.5$  "Tee"  
 $k\_check=0.4$  "Valvula Check"  
 $n\_c90=6$   
 $n\_tee=2$   
 $n\_check=1$   
 $N\_F=k\_val*n\_val + k\_c90*n\_c90+k\_tee*n\_tee+k\_check*n\_check$   
 "Altura de los ramales, todos esran a 3 m"  
 $h=3 [m]$   
 "Caida de presion en Branch-A"  
 $K\_friction\_A=(32*L\_a*rho*f\_a)/(d\_a^5*Pi^2*1000)$   
 $K\_fitting\_A=(8*rho*N\_C)/(d\_a^4*Pi^2*1000)$   
 $K\_A=K\_friction\_A+K\_fitting\_A+Kexch\_h1$   
 $Kexch\_h1=Delta\_P\_t1/V\_a^2$   
 $V\_a^2*K\_A+(rho*g*h/1000)=Delta\_p\_A$   
 $Delta\_p\_A=Delta\_pC$   
 $f\_a=(0.007)+(0.528/Re\_a^{0.42})$   
 $Re\_a=(d\_a*rho*u\_a)/mu$   
 $u\_a=(4*V\_a)/(Pi*d\_a^2)$   
 $g=9.81[m/s^2]$   
 $L\_a=4 [m]$  "L Ong. de los tubos de conexion"  
 "dP ramales"  
 "BRA NCH-B"  
 $K\_friction\_B=(32*L\_B*rho*f\_B)/(d\_B^5*Pi^2*1000)$   
 $K\_fitting\_B=(8*rho*N\_C)/(d\_B^4*Pi^2*1000)$

$K_B = K_{friction\_B} + K_{fiting\_B} + K_{exch\_h4}$   
 $\Delta p_B = K_B \cdot V_B^2 + (\rho \cdot g \cdot h / 1000)$   
 $\Delta p_B = \Delta p_C$   
 $f_B = (0.007) + (0.528 / Re_B)^{0.42}$   
 $Re_B = (d_B \cdot \rho \cdot u_B) / \mu$   
 $u_B = (4 \cdot V_B) / (\pi \cdot d_B^2)$   
 $K_{exch\_h4} = \Delta P_{t4} / V_B^2$   
 $L_B = 4 \text{ [m]}$  "LOng. de los tubos de conexion"  
 "Caida de presion en Branch-C"  
 $K_C \cdot V_c^2 + (\rho \cdot g \cdot h / 1000) = \Delta p_C$   
 $u_c = (4 \cdot V_c) / (\pi \cdot d_c^2)$   
 $K_C = K_{friction\_C} + K_{fiting\_C} + K_{exch\_h6}$   
 $K_{friction\_C} = (32 \cdot L_c \cdot \rho \cdot f_c) / (d_c^5 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{fiting\_C} = (8 \cdot \rho \cdot N_C) / (d_c^4 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{exch\_h6} = \Delta P_{t6} / V_c^2$   
 $f_c = (0.007) + (0.528 / Re_c)^{0.42}$   
 $Re_c = (d_c \cdot \rho \cdot u_c) / \mu$   
 $L_c = 4 \text{ [m]}$  "LOng. de los tubos de conexion"  
 "Caida de presion en Branch-D"  
 $K_D \cdot V_D^2 + (\rho \cdot g \cdot h / 1000) = \Delta p_D$   
 $u_D = (4 \cdot V_D) / (\pi \cdot d_D^2)$   
 $K_D = K_{friction\_D} + K_{fiting\_D} + K_{exch\_h7}$   
 $K_{friction\_D} = (32 \cdot L_D \cdot \rho \cdot f_D) / (d_D^5 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{fiting\_D} = (8 \cdot \rho \cdot N_C) / (d_D^4 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{exch\_h7} = \Delta P_{t7} / V_D^2$   
 $\Delta p_D = \Delta p_C$   
 $f_D = (0.007) + (0.528 / Re_D)^{0.42}$   
 $Re_D = (d_D \cdot \rho \cdot u_D) / \mu$   
 $L_D = 4 \text{ [m]}$  "LOng. de los tubos de conexion"  
 "Caida de presion en Branch-G"  
 $K_G \cdot V_G^2 + (\rho \cdot g \cdot h / 1000) = \Delta p_G$   
 $u_G = (4 \cdot V_G) / (\pi \cdot d_G^2)$   
 $K_G = K_{friction\_G} + K_{fiting\_G} + K_{exch\_h3}$   
 $K_{friction\_G} = (32 \cdot L_G \cdot \rho \cdot f_G) / (d_G^5 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{fiting\_G} = (8 \cdot \rho \cdot N_C) / (d_G^4 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{exch\_h3} = \Delta P_{t3} / V_G^2$   
 $\Delta p_G = \Delta p_C$   
 $f_G = (0.007) + (0.528 / Re_G)^{0.42}$   
 $Re_G = (d_G \cdot \rho \cdot u_G) / \mu$   
 $L_G = 4 \text{ [m]}$  "LOng. de los tubos de conexion"  
 "Caida de presion en Branch-H"  
 $K_H \cdot V_H^2 + (\rho \cdot g \cdot h / 1000) = \Delta p_H$   
 $u_H = (4 \cdot V_H) / (\pi \cdot d_H^2)$   
 $K_H = K_{friction\_H} + K_{fiting\_H} + K_{exch\_h2}$   
 $K_{friction\_H} = (32 \cdot L_H \cdot \rho \cdot f_H) / (d_H^5 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{fiting\_H} = (8 \cdot \rho \cdot N_C) / (d_H^4 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $\Delta p_C = \Delta p_H$   
 $K_{exch\_h2} = \Delta P_{t2} / V_H^2$   
 $f_H = (0.007) + (0.528 / Re_H)^{0.42}$   
 $Re_H = (d_H \cdot \rho \cdot u_H) / \mu$   
 $L_H = 4 \text{ [m]}$  "LOng. de los tubos de conexion"  
 "Caida de presion en Branch-I IC5"  
 $K_I \cdot V_I^2 + (\rho \cdot g \cdot h / 1000) = \Delta p_I$   
 $u_I = (4 \cdot V_I) / (\pi \cdot d_I^2)$   
 $K_I = K_{friction\_I} + K_{fiting\_I} + K_{exch\_h5}$   
 $K_{friction\_I} = (32 \cdot L_I \cdot \rho \cdot f_I) / (d_I^5 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{fiting\_I} = (8 \cdot \rho \cdot N_C) / (d_I^4 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$



$\Delta_{pC} = \Delta_{pI}$   
 $K_{exch\_h5} = \Delta_{p\_t5} / V_{I^2}$   
 $f_I = (0.007) + (0.528 / Re_I)^{0.42}$   
 $Re_I = (d_I \cdot \rho \cdot u_I) / \mu$   
 $L_I = 4 \text{ [m]}$  "L Ong. de los tubos de conexion"  
 "Feed Branch"  
 $K_{friction\_F} = (32 \cdot L_F \cdot \rho \cdot f_F) / (d_F^5 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_{fitting\_F} = (8 \cdot \rho \cdot N_F) / (d_F^4 \cdot \pi^2 \cdot 1000)$   
 $K_F = K_{friction\_F} + K_{fitting\_F}$   
 $f_F = (0.007) + (0.528 / Re_F)^{0.42}$   
 $Re_F = (d_F \cdot \rho \cdot u_F) / \mu$   
 $u_F = (4 \cdot V_F) / (\pi \cdot d_F^2)$   
 $K_F \cdot V_F^2 + (\rho \cdot 9.81 \cdot 3 / 1000) = \Delta_{p\_F}$   
 $L_F = 160 \text{ [m]}$  "L Ong. de los tubos de conexion"  
 "Calculo de los flujos"  
 $V_a + V_B + V_c + V_D + V_G + V_H + V_I = V_F$   
 $Ke = 1 / ((1/K_A)^{0.5} + (1/K_B)^{0.5} + (1/K_C)^{0.5} + (1/K_D)^{0.5} + (1/K_G)^{0.5} + (1/K_H)^{0.5} + (1/K_I)^{0.5})^2$   
 $\Delta_{pT} = K_{total} \cdot V_F^2$   
 $K_{total} = Ke + K_F$   
 "Lado de la carcasa-fluido caliente"  
 "Temp. de entrada de las CH"  
 $T_{Hi} = 85$   
 $T_{Hi4} = 85$   
 $T_{Hi5} = 70$   
 $T_{Hi1} = 75$   
 $T_{Hi2} = 70$   
 $T_{Hi3} = 75$   
 $T_{Hi7} = 80$   
 $P_H = 2$  "Presion de las CH"  
 "Numero de Pasos por los Tubos"  
 $N_{pc1} = 8$   
 $N_{pc2} = 6$   
 $N_{pc3} = 4$   
 $N_{pc4} = 4$   
 $N_{pc5} = 6$   
 $N_{pc7} = 6$   
 $N_{pc} = 4$   
 $G_s = m_{dot\_H} / A_{paso}$   
 $N_b = 4$   
 "Caida de presion en los tubos"  
 $\Delta_{p\_c} = ((cf \cdot G_s^2 \cdot (N_b + 1) \cdot D_s) / (2 \cdot \rho \cdot v_{drc} \cdot D_{o\_tubo} \cdot (\mu_{v\_drc} / \mu_{w\_drc})^{0.14})) \cdot \text{convert}(\text{pa}, \text{kpa})$   
 $cf = \exp(0.576 - 0.19 \cdot \ln(Re_{drc}))$   
 $\Delta_{p\_t} = (((4 \cdot (cf_t) \cdot L_{tubo} \cdot N_{pc} / D_{t+4} \cdot N_{pc}) \cdot (\rho_{sc\_drc} \cdot V_{max}^2 / 2))) \cdot \text{convert}(\text{pa}, \text{kpa})$   
 $cf_t = 1 / (1.58 \cdot \ln(Re_{sc\_drc}) - 3.28)^2$   
 $\Delta_{p\_t4} = (((4 \cdot (cf_{t4}) \cdot L_{tubo} \cdot N_{pc4} / D_{t4} \cdot 4 \cdot N_{pc4}) \cdot (\rho_{sc\_drc} \cdot V_{max4}^2 / 2))) \cdot \text{convert}(\text{pa}, \text{kpa})$   
 $cf_{t4} = 1 / (1.58 \cdot \ln(Re_{sc\_drc4}) - 3.28)^2$   
 $\Delta_{p\_t5} = (((4 \cdot (cf_{t5}) \cdot L_{tubo} \cdot N_{pc5} / D_{t5} \cdot 4 \cdot N_{pc5}) \cdot (\rho_{sc\_drc} \cdot V_{max5}^2 / 2))) \cdot \text{convert}(\text{pa}, \text{kpa})$   
 $cf_{t5} = 1 / (1.58 \cdot \ln(Re_{sc\_drc5}) - 3.28)^2$   
 $\Delta_{p\_t1} = (((4 \cdot (cf_{t1}) \cdot L_{tubo} \cdot N_{pc1} / D_{t1} \cdot 4 \cdot N_{pc1}) \cdot (\rho_{sc\_drc} \cdot V_{max1}^2 / 2))) \cdot \text{convert}(\text{pa}, \text{kpa})$   
 $cf_{t1} = 1 / (1.58 \cdot \ln(Re_{sc\_drc1}) - 3.28)^2$   
 $\Delta_{p\_t2} = (((4 \cdot (cf_{t2}) \cdot L_{tubo} \cdot N_{pc2} / D_{t2} \cdot 4 \cdot N_{pc2}) \cdot (\rho_{sc\_drc} \cdot V_{max2}^2 / 2))) \cdot \text{convert}(\text{pa}, \text{kpa})$

$cf\_t2=1/(1.58*LN(Re\_sc\_drc2)-3.28)^2$   
 $Delta\_P\_t3=((4*(cf\_t3)*L\_tubo3*N\_pc3/D\_t3+4*N\_pc3)*(rho\_sc\_drc3*V\_max3^2/2))^{0.5}$  convert (pa,kpa)  
 $cf\_t3=1/(1.58*LN(Re\_sc\_drc3)-3.28)^2$   
 $Delta\_P\_t7=((4*(cf\_t7)*L\_tubo7*N\_pc7/D\_t7+4*N\_pc7)*(rho\_sc\_drc7*V\_max7^2/2))^{0.5}$  convert (pa,kpa)  
 $cf\_t7=1/(1.58*LN(Re\_sc\_drc7)-3.28)^2$   
**"Lado de los tubos"**  
P\_C=1.03 **"Presion del AE"**  
**"Temp. de entrada del AE a los IC"**  
T\_C\_i4=T\_C\_i  
T\_C\_i5=T\_C\_i  
T\_C\_i1=T\_C\_i  
T\_C\_i2=T\_C\_i  
T\_C\_i3=T\_C\_i  
T\_C\_i7=T\_C\_i  
**"Long. de los IC"**  
L\_tubo1=3.66 [m]  
L\_tubo2=4.83 [m]  
L\_tubo3=6.18 [m]  
L\_tubo4=6.18 [m]  
L\_tubo5=6.18 [m]  
L\_tubo7=4.83 [m]  
L\_tubo=6.18  
**"Balance de energia"**  
 $QC_s=(m\_dot\_C3+m\_dot\_C+m\_dot\_C5+m\_dot\_C1+m\_dot\_C2+m\_dot\_C7+m\_dot\_C4)*Cp\_sc\_drc*(TC_s-T\_C\_i)$   
 $QC_s=Q+Q1+Q2+Q3+Q4+Q5+Q7$   
**"Balances de Energia con los by passes"**  
 $m\_dot\_H1*C\_ref\_drc1*(THs1-T\_HO1)=(m\_dot\_H1B*C\_ref\_drc1)*(T\_Hi1-THs1)$   
 $m\_dot\_H2*C\_ref\_drc2*(THs2-T\_HO2)=(m\_dot\_H2B*C\_ref\_drc2)*(T\_Hi2-THs2)$   
 $m\_dot\_H3*C\_ref\_drc3*(THs3-T\_HO3)=(m\_dot\_H3B*C\_ref\_drc3)*(T\_Hi3-THs3)$   
 $m\_dot\_H4*C\_ref\_drc4*(THs4-T\_HO4)=(m\_dot\_H4B*C\_ref\_drc4)*(T\_Hi4-THs4)$   
 $m\_dot\_H5*C\_ref\_drc5*(THs5-T\_HO5)=(m\_dot\_H5B*C\_ref\_drc5)*(T\_Hi5-THs5)$   
 $m\_dot\_H*C\_ref\_drc*(THs-T\_HO)=(m\_dot\_HB*C\_ref\_drc)*(T\_Hi-THs)$   
 $m\_dot\_H7*C\_ref\_drc7*(THs7-T\_HO7)=(m\_dot\_H7B*C\_ref\_drc7)*(T\_Hi7-THs7)$   
K\_tubo=60 **"Conductividad termica de la tuberia"**  
**"Pitch en IC"**  
Pitch1=1.25\*D\_i\_tubo1  
Pitch2=1.25\*D\_i\_tubo2  
Pitch3=2\*D\_i\_tubo3  
Pitch4=1.5\*D\_i\_tubo4  
Pitch5=1.25\*D\_i\_tubo5  
Pitch7=1.25\*D\_i\_tubo7  
Pitch=1.4\*D\_i\_tubo  
**"Balances de energia"**  
 $Q=m\_dot\_C*Cp\_sc\_drc*(T\_C\_O-T\_C\_i)$   
 $Q=m\_dot\_H*Cp\_ref\_drc*(T\_Hi-T\_HO)$   
Cmin\_drc=C\_ref\_drc  
Cr\_drc=(C\_ref\_drc/C\_sc\_drc)  
 $Q4=m\_dot\_C4*Cp\_sc\_drc4*(T\_C\_O4-T\_C\_i4)$   
 $Q4=m\_dot\_H4*Cp\_ref\_drc4*(T\_Hi4-T\_HO4)$   
Cmin\_drc4=C\_ref\_drc4  
Cr\_drc4=(C\_ref\_drc4/C\_sc\_drc4)  
 $Q5=m\_dot\_C5*Cp\_sc\_drc5*(T\_C\_O5-T\_C\_i5)$   
 $Q5=m\_dot\_H5*Cp\_ref\_drc5*(T\_Hi5-T\_HO5)$   
Cmin\_drc5=C\_ref\_drc5

$Cr\_drc5=(C\_ref\_drc5/C\_sc\_drc5)$   
 $Q1=m\_dot\_C1*Cp\_sc\_drc1*(T\_C\_O1-T\_C\_i1)$   
 $Q1=m\_dot\_H1*Cp\_ref\_drc1*(T\_Hi1-T\_HO1)$   
 $Cmin\_drc1=C\_ref\_drc1$   
 $Cr\_drc1=(C\_ref\_drc1/C\_sc\_drc1)$   
 $Q2=m\_dot\_C2*Cp\_sc\_drc2*(T\_C\_O2-T\_C\_i2)$   
 $Q2=m\_dot\_H2*Cp\_ref\_drc2*(T\_Hi2-T\_HO2)$   
 $Cmin\_drc2=C\_ref\_drc2$   
 $Cr\_drc2=(C\_ref\_drc2/C\_sc\_drc2)$   
 $Q3=m\_dot\_C3*Cp\_sc\_drc3*(T\_C\_O3-T\_C\_i3)$   
 $Q3=m\_dot\_H3*Cp\_ref\_drc3*(T\_Hi3-T\_HO3)$   
 $Cmin\_drc3=C\_ref\_drc3$   
 $Cr\_drc3=(C\_ref\_drc3/C\_sc\_drc3)$   
 $Q7=m\_dot\_C7*Cp\_sc\_drc7*(T\_C\_O7-T\_C\_i7)$   
 $Q7=m\_dot\_H7*Cp\_ref\_drc7*(T\_Hi7-T\_HO7)$   
 $Cmin\_drc7=C\_ref\_drc7$   
 $Cr\_drc7=(C\_ref\_drc7/C\_sc\_drc7)$   
**"Calculo NTU y U"**  
 $m\_dot\_H*Cp\_ref\_drc*(T\_Hi-T\_HO)=epsilon*C\_ref\_drc*(T\_Hi-T\_C\_i)$   
 $epsilon*(1+Cr\_drc+(1+Cr\_drc^2)^{(1/2)}*((1+exp(-NTU*(1+Cr\_drc^2)^{(1/2)}))))=2*(1-exp(-NTU*(1+Cr\_drc^2)^{(1/2)}))$   
 $NTU=U*A/(1000*Cmin\_drc)$   
 $1/U=1/ho+(1/hi)*(D\_o\_tubo/D\_t)+(D\_o\_tubo/2)*(ln(D\_o\_tubo/D\_t)/K\_tubo)+R\_s+R\_t*(D\_o\_tubo/D\_t)$   
 $m\_dot\_H4*Cp\_ref\_drc4*(T\_Hi4-T\_HO4)=epsilon4*Cmin\_drc4*(T\_Hi4-T\_C\_i4)$   
 $epsilon4*(1+Cr\_drc4+(1+Cr\_drc4^2)^{(1/2)}*((1+exp(-NTU4*(1+Cr\_drc4^2)^{(1/2)}))))=2*(1-exp(-NTU4*(1+Cr\_drc4^2)^{(1/2)}))$   
 $NTU4=U4*A4/(1000*Cmin\_drc4)$   
 $1/U4=1/ho4+(1/hi4)*(D\_o\_tubo4/D\_t4)+(D\_o\_tubo4/2)*(ln(D\_o\_tubo4/D\_t4)/K\_tubo)+R\_s4+R\_t*(D\_o\_tubo4/D\_t4)$   
 $m\_dot\_H5*Cp\_ref\_drc5*(T\_Hi5-T\_HO5)=epsilon5*Cmin\_drc5*(T\_Hi5-T\_C\_i5)$   
 $epsilon5*(1+Cr\_drc5+(1+Cr\_drc5^2)^{(1/2)}*((1+exp(-NTU5*(1+Cr\_drc5^2)^{(1/2)}))))=2*(1-exp(-NTU5*(1+Cr\_drc5^2)^{(1/2)}))$   
 $NTU5=U5*A5/(1000*Cmin\_drc5)$   
 $1/U5=1/ho5+(1/hi5)*(D\_o\_tubo5/D\_t5)+(D\_o\_tubo5/2)*(ln(D\_o\_tubo5/D\_t5)/K\_tubo)+R\_s5+R\_t*(D\_o\_tubo5/D\_t5)$   
 $m\_dot\_H1*Cp\_ref\_drc1*(T\_Hi1-T\_HO1)=epsilon1*Cmin\_drc1*(T\_Hi1-T\_C\_i1)$   
 $epsilon1*(1+Cr\_drc1+(1+Cr\_drc1^2)^{(1/2)}*((1+exp(-NTU1*(1+Cr\_drc1^2)^{(1/2)}))))=2*(1-exp(-NTU1*(1+Cr\_drc1^2)^{(1/2)}))$   
 $NTU1=U1*A1/(1000*Cmin\_drc1)$   
 $1/U1=1/ho1+(1/hi1)*(D\_o\_tubo1/D\_t1)+(D\_o\_tubo1/2)*(ln(D\_o\_tubo1/D\_t1)/K\_tubo)+R\_s1+R\_t*(D\_o\_tubo1/D\_t1)$   
 $m\_dot\_H2*Cp\_ref\_drc2*(T\_Hi2-T\_HO2)=epsilon2*Cmin\_drc2*(T\_Hi2-T\_C\_i2)$   
 $epsilon2*(1+Cr\_drc2+(1+Cr\_drc2^2)^{(1/2)}*((1+exp(-NTU2*(1+Cr\_drc2^2)^{(1/2)}))))=2*(1-exp(-NTU2*(1+Cr\_drc2^2)^{(1/2)}))$   
 $NTU2=U2*A2/(1000*Cmin\_drc2)$   
 $1/U2=1/ho2+(1/hi2)*(D\_o\_tubo2/D\_t2)+(D\_o\_tubo2/2)*(ln(D\_o\_tubo2/D\_t2)/K\_tubo)+R\_s2+R\_t*(D\_o\_tubo2/D\_t2)$   
 $m\_dot\_H3*Cp\_ref\_drc3*(T\_Hi3-T\_HO3)=epsilon3*Cmin\_drc3*(T\_Hi3-T\_C\_i3)$   
 $epsilon3*(1+Cr\_drc3+(1+Cr\_drc3^2)^{(1/2)}*((1+exp(-NTU3*(1+Cr\_drc3^2)^{(1/2)}))))=2*(1-exp(-NTU3*(1+Cr\_drc3^2)^{(1/2)}))$   
 $NTU3=U3*A3/(1000*Cmin\_drc3)$   
 $1/U3=1/ho3+(1/hi3)*(D\_o\_tubo3/D\_t3)+(D\_o\_tubo3/2)*(ln(D\_o\_tubo3/D\_t3)/K\_tubo)+R\_s3+R\_t*(D\_o\_tubo3/D\_t3)$   
 $m\_dot\_H7*Cp\_ref\_drc7*(T\_Hi7-T\_HO7)=epsilon7*Cmin\_drc7*(T\_Hi7-T\_C\_i7)$   
 $epsilon7*(1+Cr\_drc7+(1+Cr\_drc7^2)^{(1/2)}*((1+exp(-NTU7*(1+Cr\_drc7^2)^{(1/2)}))))=2*(1-exp(-NTU7*(1+Cr\_drc7^2)^{(1/2)}))$

$NTU7=U7*A7/(1000*Cmin\_drc7)$   
 $1/U7=1/ho7+(1/hi7)*(D\_o\_tubo7/D\_t7)+(D\_o\_tubo7/2)*(ln(D\_o\_tubo7/D\_t7)/K\_tubo)+R\_s7+R\_t*(D\_o\_tubo7/D\_t7)$   
 $R\_t=0.00018$

**"Calculos de las Areas de Transferencia de Calor"**

$Nt1=A1/(L\_tubo1*Pi*D\_o\_tubo1)$   
 $Nt2=A2/(L\_tubo2*Pi*D\_o\_tubo2)$   
 $Nt3=A3/(L\_tubo3*Pi*D\_o\_tubo3)$   
 $Nt5=A5/(L\_tubo5*Pi*D\_o\_tubo5)$   
 $Nt4=A4/(L\_tubo4*Pi*D\_o\_tubo4)$   
 $Nt7=A7/(L\_tubo7*Pi*D\_o\_tubo7)$   
 $Nt=A/(L\_tubo*Pi*D\_o\_tubo)$

**"Temperaturas a lo largo de los tubos"**

$Tx=T\_C\_O+(Q*P\_x*L\_tubo)/(C\_sc\_drc)$   
 $P\_x=0.0072$   
 $Tx\_drc=T\_HO-(Q*P\_x*L\_tubo)/(C\_ref\_drc)$   
 $P\_x2=0.003$   
 $Tx4=T\_C\_O4+(Q4*P\_x*L\_tubo4)/(C\_sc\_drc4)$   
 $Tx\_drc4=T\_HO4-(Q4*P\_x2*L\_tubo4)/(C\_ref\_drc4)$   
 $Tx5=T\_C\_O5+(Q5*P\_x*L\_tubo5)/(C\_sc\_drc5)$   
 $Tx\_drc5=T\_HO5-(Q5*P\_x2*L\_tubo5)/(C\_ref\_drc5)$   
 $Tx1=T\_C\_O1+(Q1*P\_x*L\_tubo1)/(C\_sc\_drc1)$   
 $Tx\_drc1=T\_HO1-(Q1*P\_x2*L\_tubo1)/(C\_ref\_drc1)$   
 $Tx2=T\_C\_O2+(Q2*P\_x*L\_tubo2)/(C\_sc\_drc2)$   
 $Tx\_drc2=T\_HO2-(Q2*P\_x2*L\_tubo2)/(C\_ref\_drc2)$   
 $Tx3=T\_C\_O3+(Q3*P\_x*L\_tubo3)/(C\_sc\_drc3)$   
 $Tx\_drc3=T\_HO3-(Q3*P\_x2*L\_tubo3)/(C\_ref\_drc3)$   
 $Tx7=T\_C\_O7+(Q7*P\_x*L\_tubo7)/(C\_sc\_drc7)$   
 $Tx\_drc7=T\_HO7-(Q7*P\_x2*L\_tubo7)/(C\_ref\_drc7)$

**"Flujo interno"**

**"Correlación de GNIELINSKI flujo interno"**

**"Calculo hs, Vmax = velocidad del fluido en los tubos"**

$hi4=((f\_drc4/8)*(Re\_sc\_drc4-1000)*Pr\_sc\_drc4)/(1+12.7*(f\_drc4/8)^(1/2)*(Pr\_sc\_drc4^(2/3)-1))*(K\_sc\_drc4/D\_t4)$   
 $f\_drc4=1/(0.79*ln(Re\_sc\_drc4)-1.64)^2$   
 $Re\_sc\_drc4=V\_max4*rho\_sc\_drc4*D\_t4/mu\_sc\_drc4$   
 $V\_max4=m\_dot\_C4/(rho\_sc\_drc4*A\_paso\_drc4)$   
 $V\_B=(V\_max4*A\_paso\_drc4)$   
 $rho\_sc\_drc4=density(water,T=(T\_C\_i4+T\_C\_O4)/2,P=P\_C)$   
 $mu\_sc\_drc4=viscosity(water,T=(T\_C\_i4+T\_C\_O4)/2,P=P\_C)$   
 $k\_sc\_drc4=conductivity(water,T=(T\_C\_i4+T\_C\_O4)/2,P=P\_C)$   
 $Cp\_sc\_drc4=CP(water,T=(T\_C\_i4+T\_C\_O4)/2,P=P\_C)$   
 $Pr\_sc\_drc4=Cp\_sc\_drc4*mu\_sc\_drc4*1000/k\_sc\_drc4$   
 $A\_paso\_drc4=(pi*D\_t4^2/4)*(Nt4/N\_pc4)$   
 $hi5=((f\_drc5/8)*(Re\_sc\_drc5-1000)*Pr\_sc\_drc5)/(1+12.7*(f\_drc5/8)^(1/2)*(Pr\_sc\_drc5^(2/3)-1))*(K\_sc\_drc5/D\_t5)$   
 $f\_drc5=1/(0.79*ln(Re\_sc\_drc5)-1.64)^2$   
 $Re\_sc\_drc5=V\_max5*rho\_sc\_drc5*D\_t5/mu\_sc\_drc5$   
 $V\_max5=m\_dot\_C5/(rho\_sc\_drc5*A\_paso\_drc5)$   
 $V\_l=(V\_max5*A\_paso\_drc5)$   
 $rho\_sc\_drc5=density(water,T=(T\_C\_i5+T\_C\_O5)/2,P=P\_C)$   
 $mu\_sc\_drc5=viscosity(water,T=(T\_C\_i5+T\_C\_O5)/2,P=P\_C)$   
 $k\_sc\_drc5=conductivity(water,T=(T\_C\_i5+T\_C\_O5)/2,P=P\_C)$   
 $Cp\_sc\_drc5=CP(water,T=(T\_C\_i5+T\_C\_O5)/2,P=P\_C)$   
 $Pr\_sc\_drc5=Cp\_sc\_drc5*mu\_sc\_drc5*1000/k\_sc\_drc5$   
 $A\_paso\_drc5=(pi*D\_t5^2/4)*(Nt5/N\_pc5)$

$hi1=((f\_drc1/8)*(Re\_sc\_drc1-1000)*Pr\_sc\_drc1)/(1+12.7*(f\_drc1/8)^{(1/2)}*(Pr\_sc\_drc1^{(2/3)}-1))*(K\_sc\_drc1/D\_t1)$   
 $f\_drc1=1/(0.79*\ln(Re\_sc\_drc1)-1.64)^2$   
 $Re\_sc\_drc1=V\_max1*\rho\_sc\_drc1*D\_t1/\mu\_sc\_drc1$   
 $V\_max1=m\_dot\_C1/(\rho\_sc\_drc1*A\_paso\_drc1)$   
 $V\_a=(V\_max1*A\_paso\_drc1)$   
 $\rho\_sc\_drc1=density(water,T=(T\_C\_i1+T\_C\_O1)/2,P=P\_C)$   
 $\mu\_sc\_drc1=viscosity(water,T=(T\_C\_i1+T\_C\_O1)/2,P=P\_C)$   
 $k\_sc\_drc1=conductivity(water,T=(T\_C\_i1+T\_C\_O1)/2,P=P\_C)$   
 $Cp\_sc\_drc1=CP(water,T=(T\_C\_i1+T\_C\_O1)/2,P=P\_C)$   
 $Pr\_sc\_drc1=Cp\_sc\_drc1*\mu\_sc\_drc1*1000/k\_sc\_drc1$   
 $A\_paso\_drc1=(\pi*D\_t1^2/4)*(Nt1/N\_pc1)$   
 $hi2=((f\_drc2/8)*(Re\_sc\_drc2-1000)*Pr\_sc\_drc2)/(1+12.7*(f\_drc2/8)^{(1/2)}*(Pr\_sc\_drc2^{(2/3)}-1))*(K\_sc\_drc2/D\_t2)$   
 $f\_drc2=1/(0.79*\ln(Re\_sc\_drc2)-1.64)^2$   
 $Re\_sc\_drc2=V\_max2*\rho\_sc\_drc2*D\_t2/\mu\_sc\_drc2$   
 $V\_max2=m\_dot\_C2/(\rho\_sc\_drc2*A\_paso\_drc2)$   
 $V\_H=(V\_max2*A\_paso\_drc2)$   
 $\rho\_sc\_drc2=density(water,T=(T\_C\_i2+T\_C\_O2)/2,P=P\_C)$   
 $\mu\_sc\_drc2=viscosity(water,T=(T\_C\_i2+T\_C\_O2)/2,P=P\_C)$   
 $k\_sc\_drc2=conductivity(water,T=(T\_C\_i2+T\_C\_O2)/2,P=P\_C)$   
 $Cp\_sc\_drc2=CP(water,T=(T\_C\_i2+T\_C\_O2)/2,P=P\_C)$   
 $Pr\_sc\_drc2=Cp\_sc\_drc2*\mu\_sc\_drc2*1000/k\_sc\_drc2$   
 $A\_paso\_drc2=(\pi*D\_t2^2/4)*(Nt2/N\_pc2)$   
 $hi3=((f\_drc3/8)*(Re\_sc\_drc3-1000)*Pr\_sc\_drc3)/(1+12.7*(f\_drc3/8)^{(1/2)}*(Pr\_sc\_drc3^{(2/3)}-1))*(K\_sc\_drc3/D\_t3)$   
 $f\_drc3=1/(0.79*\ln(Re\_sc\_drc3)-1.64)^2$   
 $Re\_sc\_drc3=V\_max3*\rho\_sc\_drc3*D\_t3/\mu\_sc\_drc3$   
 $V\_max3=m\_dot\_C3/(\rho\_sc\_drc3*A\_paso\_drc3)$   
 $V\_G=(V\_max3*A\_paso\_drc3)$   
 $\rho\_sc\_drc3=density(water,T=(T\_C\_i3+T\_C\_O3)/2,P=P\_C)$   
 $\mu\_sc\_drc3=viscosity(water,T=(T\_C\_i3+T\_C\_O3)/2,P=P\_C)$   
 $k\_sc\_drc3=conductivity(water,T=(T\_C\_i3+T\_C\_O3)/2,P=P\_C)$   
 $Cp\_sc\_drc3=CP(water,T=(T\_C\_i3+T\_C\_O3)/2,P=P\_C)$   
 $Pr\_sc\_drc3=Cp\_sc\_drc3*\mu\_sc\_drc3*1000/k\_sc\_drc3$   
 $A\_paso\_drc3=(\pi*D\_t3^2/4)*(Nt3/N\_pc3)$   
 $hi7=((f\_drc7/8)*(Re\_sc\_drc7-1000)*Pr\_sc\_drc7)/(1+12.7*(f\_drc7/8)^{(1/2)}*(Pr\_sc\_drc7^{(2/3)}-1))*(K\_sc\_drc7/D\_t7)$   
 $f\_drc7=1/(0.79*\ln(Re\_sc\_drc7)-1.64)^2$   
 $Re\_sc\_drc7=V\_max7*\rho\_sc\_drc7*D\_t7/\mu\_sc\_drc7$   
 $V\_max7=m\_dot\_C7/(\rho\_sc\_drc7*A\_paso\_drc7)$   
 $V\_D=(V\_max7*A\_paso\_drc7)$   
 $\rho\_sc\_drc7=density(water,T=(T\_C\_i7+T\_C\_O7)/2,P=P\_C)$   
 $\mu\_sc\_drc7=viscosity(water,T=(T\_C\_i7+T\_C\_O7)/2,P=P\_C)$   
 $k\_sc\_drc7=conductivity(water,T=(T\_C\_i7+T\_C\_O7)/2,P=P\_C)$   
 $Cp\_sc\_drc7=CP(water,T=(T\_C\_i7+T\_C\_O7)/2,P=P\_C)$   
 $Pr\_sc\_drc7=Cp\_sc\_drc7*\mu\_sc\_drc7*1000/k\_sc\_drc7$   
 $A\_paso\_drc7=(\pi*D\_t7^2/4)*(Nt7/N\_pc7)$   
 $hi=((f\_drc/8)*(Re\_sc\_drc-1000)*Pr\_sc\_drc)/(1+12.7*(f\_drc/8)^{(1/2)}*(Pr\_sc\_drc^{(2/3)}-1))*(K\_sc\_drc/D\_t)$   
 $f\_drc=1/(0.79*\ln(Re\_sc\_drc)-1.64)^2$   
 $Re\_sc\_drc=V\_max*\rho\_sc\_drc*D\_t/\mu\_sc\_drc$   
 $V\_max=m\_dot\_C/(\rho\_sc\_drc*A\_paso\_drc)$   
 $V\_c=(V\_max*A\_paso\_drc)$   
 $\rho\_sc\_drc=density(water,T=(T\_C\_i+T\_C\_O)/2,P=P\_C)$   
 $\mu\_sc\_drc=viscosity(water,T=(T\_C\_i+T\_C\_O)/2,P=P\_C)$   
 $k\_sc\_drc=conductivity(water,T=(T\_C\_i+T\_C\_O)/2,P=P\_C)$

$$Cp\_sc\_drc=CP(\text{water},T=(T\_C\_i+T\_C\_O)/2,P=P\_C)$$

$$Pr\_sc\_drc=Cp\_sc\_drc*\mu\_sc\_drc*1000/k\_sc\_drc$$

$$A\_paso\_drc=(\pi*D\_t^2/4)*(Nt/N\_pc)$$

"Flujo externo"

"Diametro de las Corazas"

$$D\_s1=0.822 \text{ [m]}$$

$$D\_s2=0.57 \text{ [m]}$$

$$D\_s3=0.389 \text{ [m]}$$

$$D\_s4=0.472 \text{ [m]}$$

$$D\_s5=0.623 \text{ [m]}$$

$$D\_s=0.502 \text{ [m]}$$

$$D\_s7=0.704 \text{ [m]}$$

$$B\_1=0.6*D\_s1$$

$$B\_2=0.6*D\_s2$$

$$B\_3=0.6*D\_s3$$

$$B\_4=0.6*D\_s4$$

$$B\_5=0.6*D\_s5$$

$$B=0.6*D\_s$$

$$B\_7=0.6*D\_s7$$

$$C\_1=\text{Pitch1}-D\_o\_tubo1$$

$$C\_2=\text{Pitch2}-D\_o\_tubo2$$

$$C\_3=\text{Pitch3}-D\_o\_tubo3$$

$$C\_4=\text{Pitch4}-D\_o\_tubo4$$

$$C\_5=\text{Pitch5}-D\_o\_tubo5$$

$$C=\text{Pitch}-D\_o\_tubo$$

$$C\_7=\text{Pitch7}-D\_o\_tubo7$$

"Calculos hos"

refrigerant\$='Water'

$$\mu\_v\_drc=\text{viscosity}(\text{refrigerant}\$,T=(T\_Hi+T\_HO)/2,P=P\_H)$$

$$\mu\_w\_drc=\text{viscosity}(\text{refrigerant}\$,T=Tw\_drc,P=P\_H)$$

$$k\_v\_drc=\text{conductivity}(\text{refrigerant}\$,T=(T\_Hi+T\_HO)/2,P=P\_H)$$

$$\rho\_v\_drc=\text{density}(\text{ water},T=(T\_Hi+T\_HO)/2,P=P\_H)$$

$$Cp\_ref\_drc=cp(\text{refrigerant}\$,T=(T\_Hi+T\_HO)/2,P=P\_H)$$

$$Pr\_v\_drc=Cp\_ref\_drc*\mu\_v\_drc*1000/k\_v\_drc$$

$$C\_sc\_drc=m\_dot\_C*Cp\_sc\_drc$$

$$C\_ref\_drc=m\_dot\_H*Cp\_ref\_drc$$

$$ho=C\_drc*(Re\_drc)^(m\_drc)*Pr\_v\_drc^(0.33)*(K\_v\_drc/D\_e)*(mu\_v\_drc/mu\_w\_drc)^0.15$$

$$A\_paso=(D\_s*C*B)/(Pitch)$$

$$V\_ref\_drc=m\_dot\_H/(\rho\_v\_drc*A\_paso)$$

$$Re\_drc=V\_ref\_drc*\rho\_v\_drc*D\_e/mu\_v\_drc$$

$$C\_drc=0.39$$

$$m\_drc=0.55$$

$$Tw\_drc=(Tx+Tx\_drc)/2$$

$$\mu\_v\_drc4=\text{viscosity}(\text{refrigerant}\$,T=(T\_Hi4+T\_HO4)/2,P=P\_H)$$

$$\mu\_w\_drc4=\text{viscosity}(\text{refrigerant}\$,T=Tw\_drc4,P=P\_H)$$

$$k\_v\_drc4=\text{conductivity}(\text{refrigerant}\$,T=(T\_Hi4+T\_HO4)/2,P=P\_H)$$

$$\rho\_v\_drc4=\text{density}(\text{ water},T=(T\_Hi4+T\_HO4)/2,P=P\_H)$$

$$Cp\_ref\_drc4=cp(\text{refrigerant}\$,T=(T\_Hi4+T\_HO4)/2,P=P\_H)$$

$$Pr\_v\_drc4=Cp\_ref\_drc4*\mu\_v\_drc4*1000/k\_v\_drc4$$

$$C\_sc\_drc4=m\_dot\_C4*Cp\_sc\_drc4$$

$$C\_ref\_drc4=m\_dot\_H4*Cp\_ref\_drc4$$

$$ho4=C\_drc4*(Re\_drc4)^(m\_drc4)*Pr\_v\_drc4^(0.33)*(K\_v\_drc4/D\_e4)*(mu\_v\_drc4/mu\_w\_drc4)^0.15$$

$$A\_paso4=(D\_s4*C\_4*B\_4)/(Pitch4)$$

$$V\_ref\_drc4=m\_dot\_H4/(\rho\_v\_drc4*A\_paso4)$$

$$Re\_drc4=V\_ref\_drc4*\rho\_v\_drc4*D\_e4/mu\_v\_drc4$$

$$Tw\_drc4=(Tx4+Tx\_drc4)/2$$

$$\mu\_v\_drc5=\text{viscosity}(\text{refrigerant}\$,T=(T\_Hi5+T\_HO5)/2,P=P\_H)$$

$\mu_{w\_drc5} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = T_{w\_drc5}, P = P_H)$   
 $k_{v\_drc5} = \text{conductivity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi5} + T_{HO5})/2, P = P_H)$   
 $\rho_{v\_drc5} = \text{density}(\text{water}, T = (T_{Hi5} + T_{HO5})/2, P = P_H)$   
 $C_{p\_ref\_drc5} = \text{cp}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi5} + T_{HO5})/2, P = P_H)$   
 $Pr_{v\_drc5} = C_{p\_ref\_drc5} * \mu_{v\_drc5} * 1000 / k_{v\_drc5}$   
 $C_{sc\_drc5} = m_{dot\_C5} * C_{p\_sc\_drc5}$   
 $C_{ref\_drc5} = m_{dot\_H5} * C_{p\_ref\_drc5}$   
 $ho5 = C_{drc5} * (Re_{drc5})^{(m_{drc})} * Pr_{v\_drc5}^{(0.33)} * (K_{v\_drc5} / D_e) * (\mu_{v\_drc5} / \mu_{w\_drc5})^{0.15}$   
 $A_{paso5} = (D_{s5} * C_{5} * B_5) / (\text{Pitch}_5)$   
 $V_{ref\_drc5} = m_{dot\_H5} / (\rho_{v\_drc5} * A_{paso5})$   
 $Re_{drc5} = V_{ref\_drc5} * \rho_{v\_drc5} * D_{e5} / \mu_{v\_drc5}$   
 $Tw_{drc5} = (Tx_5 + Tx_{drc5}) / 2$   
 $\mu_{v\_drc1} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi1} + T_{HO1})/2, P = P_H)$   
 $\mu_{w\_drc1} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = Tw_{drc1}, P = P_H)$   
 $k_{v\_drc1} = \text{conductivity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi1} + T_{HO1})/2, P = P_H)$   
 $\rho_{v\_drc1} = \text{density}(\text{water}, T = (T_{Hi1} + T_{HO1})/2, P = P_H)$   
 $C_{p\_ref\_drc1} = \text{cp}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi1} + T_{HO1})/2, P = P_H)$   
 $Pr_{v\_drc1} = C_{p\_ref\_drc1} * \mu_{v\_drc1} * 1000 / k_{v\_drc1}$   
 $C_{sc\_drc1} = m_{dot\_C1} * C_{p\_sc\_drc1}$   
 $C_{ref\_drc1} = m_{dot\_H1} * C_{p\_ref\_drc1}$   
 $ho1 = C_{drc1} * (Re_{drc1})^{(m_{drc})} * Pr_{v\_drc1}^{(0.33)} * (K_{v\_drc1} / D_{e1}) * (\mu_{v\_drc1} / \mu_{w\_drc1})^{0.15}$   
 $A_{paso1} = (D_{s1} * C_{1} * B_1) / (\text{Pitch}_1)$   
 $V_{ref\_drc1} = m_{dot\_H1} / (\rho_{v\_drc1} * A_{paso1})$   
 $Re_{drc1} = V_{ref\_drc1} * \rho_{v\_drc1} * D_{e1} / \mu_{v\_drc1}$   
 $Tw_{drc1} = (Tx_1 + Tx_{drc1}) / 2$   
 $\mu_{v\_drc2} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi2} + T_{HO2})/2, P = P_H)$   
 $\mu_{w\_drc2} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = Tw_{drc2}, P = P_H)$   
 $k_{v\_drc2} = \text{conductivity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi2} + T_{HO2})/2, P = P_H)$   
 $\rho_{v\_drc2} = \text{density}(\text{water}, T = (T_{Hi2} + T_{HO2})/2, P = P_H)$   
 $C_{p\_ref\_drc2} = \text{cp}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi2} + T_{HO2})/2, P = P_H)$   
 $Pr_{v\_drc2} = C_{p\_ref\_drc2} * \mu_{v\_drc2} * 1000 / k_{v\_drc2}$   
 $C_{sc\_drc2} = m_{dot\_C2} * C_{p\_sc\_drc2}$   
 $C_{ref\_drc2} = m_{dot\_H2} * C_{p\_ref\_drc2}$   
 $ho2 = C_{drc2} * (Re_{drc2})^{(m_{drc})} * Pr_{v\_drc2}^{(0.33)} * (K_{v\_drc2} / D_{e2}) * (\mu_{v\_drc2} / \mu_{w\_drc2})^{0.15}$   
 $A_{paso2} = (D_{s2} * C_{2} * B_2) / (\text{Pitch}_2)$   
 $V_{ref\_drc2} = m_{dot\_H2} / (\rho_{v\_drc2} * A_{paso2})$   
 $Re_{drc2} = V_{ref\_drc2} * \rho_{v\_drc2} * D_{e2} / \mu_{v\_drc2}$   
 $Tw_{drc2} = (Tx_2 + Tx_{drc2}) / 2$   
 $\mu_{v\_drc3} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi3} + T_{HO3})/2, P = P_H)$   
 $\mu_{w\_drc3} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = Tw_{drc3}, P = P_H)$   
 $k_{v\_drc3} = \text{conductivity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi3} + T_{HO3})/2, P = P_H)$   
 $\rho_{v\_drc3} = \text{density}(\text{water}, T = (T_{Hi3} + T_{HO3})/2, P = P_H)$   
 $C_{p\_ref\_drc3} = \text{cp}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi3} + T_{HO3})/2, P = P_H)$   
 $Pr_{v\_drc3} = C_{p\_ref\_drc3} * \mu_{v\_drc3} * 1000 / k_{v\_drc3}$   
 $C_{sc\_drc3} = m_{dot\_C3} * C_{p\_sc\_drc3}$   
 $C_{ref\_drc3} = m_{dot\_H3} * C_{p\_ref\_drc3}$   
 $ho3 = C_{drc3} * (Re_{drc3})^{(m_{drc})} * Pr_{v\_drc3}^{(0.33)} * (K_{v\_drc3} / D_{e3}) * (\mu_{v\_drc3} / \mu_{w\_drc3})^{0.15}$   
 $A_{paso3} = (D_{s3} * C_{3} * B_3) / (\text{Pitch}_3)$   
 $V_{ref\_drc3} = m_{dot\_H3} / (\rho_{v\_drc3} * A_{paso3})$   
 $Re_{drc3} = V_{ref\_drc3} * \rho_{v\_drc3} * D_{e3} / \mu_{v\_drc3}$   
 $Tw_{drc3} = (Tx_3 + Tx_{drc3}) / 2$   
 $\mu_{v\_drc7} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi7} + T_{HO7})/2, P = P_H)$   
 $\mu_{w\_drc7} = \text{viscosity}(\text{refrigerant}, T = Tw_{drc7}, P = P_H)$   
 $k_{v\_drc7} = \text{conductivity}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi7} + T_{HO7})/2, P = P_H)$   
 $\rho_{v\_drc7} = \text{density}(\text{water}, T = (T_{Hi7} + T_{HO7})/2, P = P_H)$   
 $C_{p\_ref\_drc7} = \text{cp}(\text{refrigerant}, T = (T_{Hi7} + T_{HO7})/2, P = P_H)$   
 $Pr_{v\_drc7} = C_{p\_ref\_drc7} * \mu_{v\_drc7} * 1000 / k_{v\_drc7}$

$C_{sc\_drc7} = m\_dot\_C7 * Cp\_sc\_drc7$   
 $C_{ref\_drc7} = m\_dot\_H7 * Cp\_ref\_drc7$   
 $ho7 = C\_drc7 * (Re\_drc7)^{(m\_drc7)} * Pr\_v\_drc7^{(0.33)} * (K\_v\_drc7 / D\_e) * (\mu\_v\_drc7 / \mu\_w\_drc7)^{0.15}$   
 $A\_paso7 = (D\_s7 * C\_7 * B\_7) / (Pitch7)$   
 $V\_ref\_drc7 = m\_dot\_H7 / (\rho\_v\_drc7 * A\_paso7)$   
 $Re\_drc7 = V\_ref\_drc7 * \rho\_v\_drc7 * D\_e7 / \mu\_v\_drc7$   
 $Tw\_drc7 = (Tx7 + Tx\_drc7) / 2$   
**"Calculo diametro equivalente"**  
 $D\_e1 = (4 * Pitch1^2) / (\pi * D\_o\_tubo1) - D\_o\_tubo1$   
 $D\_e2 = (4 * Pitch2^2) / (\pi * D\_o\_tubo2) - D\_o\_tubo2$   
 $D\_e3 = (4 * Pitch3^2) / (\pi * D\_o\_tubo3) - D\_o\_tubo3$   
 $D\_e4 = (4 * Pitch4^2) / (\pi * D\_o\_tubo4) - D\_o\_tubo4$   
 $D\_e5 = (4 * Pitch5^2) / (\pi * D\_o\_tubo5) - D\_o\_tubo5$   
 $D\_e = (4 * Pitch^2) / (\pi * D\_o\_tubo) - D\_o\_tubo$   
 $D\_e7 = (4 * Pitch7^2) / (\pi * D\_o\_tubo7) - D\_o\_tubo7$   
**"Calculo de la velocidad de deposicion de suciedad kg/m^2\*s"**  
 $md\_dot1 = (Beta1/2) * ((Ca + CO3) + Beta1 / (f1 * kr1) - \sqrt{((Beta1 + (Ca + CO3) * f1 * kr1)^2 + 4 * f1^2 * kr1^2 * (-Ca * CO3 + C\_sat1)) / (f1^2 * kr1^2)})$   
 $md\_dot2 = (Beta2/2) * ((Ca + CO3) + Beta2 / (f2 * kr2) - \sqrt{((Beta2 + (Ca + CO3) * f2 * kr2)^2 + 4 * f2^2 * kr2^2 * (-Ca * CO3 + C\_sat2)) / (f2^2 * kr2^2)})$   
 $md\_dot3 = (Beta3/2) * ((Ca + CO3) + Beta3 / (f3 * kr3) - \sqrt{((Beta3 + (Ca + CO3) * f3 * kr3)^2 + 4 * f3^2 * kr3^2 * (-Ca * CO3 + C\_sat3)) / (f3^2 * kr3^2)})$   
 $md\_dot5 = (Beta5/2) * ((Ca + CO3) + Beta5 / (f5 * kr5) - \sqrt{((Beta5 + (Ca + CO3) * f5 * kr5)^2 + 4 * f5^2 * kr5^2 * (-Ca * CO3 + C\_sat5)) / (f5^2 * kr5^2)})$   
 $md\_dot4 = (Beta4/2) * ((Ca + CO3) + Beta4 / (f4 * kr4) - \sqrt{((Beta4 + (Ca + CO3) * f4 * kr4)^2 + 4 * f4^2 * kr4^2 * (-Ca * CO3 + C\_sat4)) / (f4^2 * kr4^2)})$   
 $md\_dot7 = (Beta7/2) * ((Ca + CO3) + Beta7 / (f7 * kr7) - \sqrt{((Beta7 + (Ca + CO3) * f7 * kr7)^2 + 4 * f7^2 * kr7^2 * (-Ca * CO3 + C\_sat7)) / (f7^2 * kr7^2)})$   
 $md\_dot = (Beta/2) * ((Ca + CO3) + Beta / (f * kr) - \sqrt{((Beta + (Ca + CO3) * f * kr)^2 + 4 * f^2 * kr^2 * (-Ca * CO3 + C\_sat)) / (f^2 * kr^2)})$   
**"-Datos de entrada--"**  
 $E = 113000 \text{ [kJ/kmol]}$  **"Energia de Activacion para Enfto."**  
 $k0 = 2.05 * 10^{(15)} \text{ {m^4/kg*s}}$   
 $D = 0.79 * 10^{(-9)} \text{ {[m^2/s]} "Difusividad"}$   
 $R = 8.314 \text{ [J/mol*K]}$  **"Cosntante de los gases"**  
 $T1 = Tx$   
 $T14 = Tx4$   
 $T15 = Tx5$   
 $T11 = Tx1$   
 $T12 = Tx2$   
 $T13 = Tx3$   
 $T17 = Tx7$   
 $CO3 = (CaCO3 / 100) * 60 * 1 \text{ [kg/m3]}$   
 $Ca = (CaCO3 / 100) * 40 \text{ [kg/m3]}$   
 $Kn = 2.34 \{0.028 \text{ peek } 1000\} * \text{convert}(\text{micrometer, mm})$   
**"-----modelo de difusion y reaccion quimica-----"**  
**"Calculos de las constantes de la velocidad reaccion Kr m^2/kg s"**  
 $kr4 = k0 * \exp(-E / (R * (Tw\_drc4 + 273)))$   
 $kr5 = k0 * \exp(-E / (R * (Tw\_drc5 + 273)))$   
 $kr1 = k0 * \exp(-E / (R * (Tw\_drc1 + 273)))$   
 $kr2 = k0 * \exp(-E / (R * (Tw\_drc2 + 273)))$   
 $kr3 = k0 * \exp(-E / (R * (Tw\_drc3 + 273)))$   
 $kr7 = k0 * \exp(-E / (R * (Tw\_drc7 + 273)))$   
 $kr = k0 * \exp(-E / (R * (Tw\_drc + 273)))$   
**"Calculo de los factores de friccion"**  
 $f = (191) / ((cf\_1) * Re^{(1.57)})$   
 $cf\_1 = (1 / (-2 * \log_{10}(2.51 / (Re * \sqrt{cf\_1}) + \epsilon / 3.71)))^2$



$f4=(191)/((cf\_14)*Re4^{(1.57)})$   
 $cf\_14=(1/(-2*\log10(2.51/(Re4*\sqrt{cf\_14}))+\epsilon_4/3.71)))^2$   
 $f5=(191)/((cf\_15)*Re5^{(1.57)})$   
 $cf\_15=(1/(-2*\log10(2.51/(Re5*\sqrt{cf\_15}))+\epsilon_5/3.71)))^2$   
 $f1=(191)/((cf\_11)*Re1^{(1.57)})$   
 $cf\_11=(1/(-2*\log10(2.51/(Re1*\sqrt{cf\_11}))+\epsilon_1/3.71)))^2$   
 $f2=(191)/((cf\_12)*Re2^{(1.57)})$   
 $cf\_12=(1/(-2*\log10(2.51/(Re2*\sqrt{cf\_12}))+\epsilon_2/3.71)))^2$   
 $f3=(191)/((cf\_13)*Re3^{(1.57)})$   
 $cf\_13=(1/(-2*\log10(2.51/(Re3*\sqrt{cf\_13}))+\epsilon_3/3.71)))^2$   
 $f7=(191)/((cf\_17)*Re7^{(1.57)})$   
 $cf\_17=(1/(-2*\log10(2.51/(Re7*\sqrt{cf\_17}))+\epsilon_7/3.71)))^2$

**"Calculo epsilons"**

$\epsilon_1=Kt1/(D\_t1)$   
 $\epsilon_2=Kt2/(D\_t2)$   
 $\epsilon_3=Kt3/(D\_t3)$   
 $\epsilon_4=Kt4/(D\_t4)$   
 $\epsilon_5=Kt5/(D\_t5)$   
 $\epsilon_6=Kt/(D\_t)$   
 $\epsilon_7=Kt7/(D\_t7)$   
 $Kt=(Kn/1000)+X6$   
 $Kt1=(Kn/1000)+X1$   
 $Kt2=(Kn/1000)+X2$   
 $Kt3=(Kn/1000)+X3$   
 $Kt4=(Kn/1000)+X4$   
 $Kt5=(Kn/1000)+X5$   
 $Kt7=(Kn/1000)+X7$   
 $c\_l=0.15$

**"Diametro remanente por ensuciamiento Dt"**

$D\_t=D\_i\_tubo-X6$   
 $D\_t4=D\_i\_tubo4-X4$   
 $D\_t1=D\_i\_tubo1-X1$   
 $D\_t2=D\_i\_tubo2-X2$   
 $D\_t3=D\_i\_tubo3-X3$   
 $D\_t5=D\_i\_tubo5-X5$   
 $D\_t7=D\_i\_tubo7-X7$

**"Calculo betas = Coeficiente de transferencia de masa"**

$Beta=(Sh*D)/(D\_t)$   
 $Beta4=(Sh4*D)/(D\_t4)$   
 $Beta5=(Sh5*D)/(D\_t5)$   
 $Beta1=(Sh1*D)/(D\_t1)$   
 $Beta2=(Sh2*D)/(D\_t2)$   
 $Beta3=(Sh3*D)/(D\_t3)$   
 $Beta7=(Sh7*D)/(D\_t7)$

**"Calculo no. de Sheerwood"**

$Sh=0.0096*(Re^{(0.913)})*(Sc^{(0.346)})$  {tubo flujo turbulento}  
 $Sh4=0.0096*(Re4^{(0.913)})*(Sc4^{(0.346)})$   
 $Sh5=0.0096*(Re5^{(0.913)})*(Sc5^{(0.346)})$   
 $Sh1=0.0096*(Re1^{(0.913)})*(Sc1^{(0.346)})$   
 $Sh2=0.0096*(Re2^{(0.913)})*(Sc2^{(0.346)})$   
 $Sh3=0.0096*(Re3^{(0.913)})*(Sc3^{(0.346)})$   
 $Sh7=0.0096*(Re7^{(0.913)})*(Sc7^{(0.346)})$

**"Calculo no. de Schmidt"**

$Sc=(\mu\_sc\_drc)/(\rho\_sc\_drc*D)$   
 $Re=(\rho\_sc\_drc*V\_max*D\_t)/\mu\_sc\_drc$   
 $Rex=(\rho\_sc\_drc*V\_max*L\_tubo)/\mu\_sc\_drc$   
 $Sc4=(\mu\_sc\_drc4)/(\rho\_sc\_drc4*D)$

$Re4=(rho\_sc\_drc4*V\_max4*D\_t4)/mu\_sc\_drc4$   
 $Rex4=(rho\_sc\_drc4*V\_max4*L\_tubo4)/mu\_sc\_drc4$   
 $Sc5=(mu\_sc\_drc5)/(rho\_sc\_drc5*D)$   
 $Re5=(rho\_sc\_drc5*V\_max5*D\_t5)/mu\_sc\_drc5$   
 $Rex5=(rho\_sc\_drc5*V\_max5*L\_tubo5)/mu\_sc\_drc5$   
 $Sc1=(mu\_sc\_drc1)/(rho\_sc\_drc1*D)$   
 $Re1=(rho\_sc\_drc1*V\_max1*D\_t1)/mu\_sc\_drc1$   
 $Rex1=(rho\_sc\_drc1*V\_max1*L\_tubo1)/mu\_sc\_drc1$   
 $Sc2=(mu\_sc\_drc2)/(rho\_sc\_drc2*D)$   
 $Re2=(rho\_sc\_drc2*V\_max2*D\_t2)/mu\_sc\_drc2$   
 $Rex2=(rho\_sc\_drc2*V\_max2*L\_tubo2)/mu\_sc\_drc2$   
 $Sc3=(mu\_sc\_drc3)/(rho\_sc\_drc3*D)$   
 $Re3=(rho\_sc\_drc3*V\_max3*D\_t3)/mu\_sc\_drc3$   
 $Rex3=(rho\_sc\_drc3*V\_max3*L\_tubo3)/mu\_sc\_drc3$   
 $Sc7=(mu\_sc\_drc7)/(rho\_sc\_drc7*D)$   
 $Re7=(rho\_sc\_drc7*V\_max7*D\_t7)/mu\_sc\_drc7$   
 $Rex7=(rho\_sc\_drc7*V\_max7*L\_tubo7)/mu\_sc\_drc7$

"-----Solubilidad del CaCO3-----"

$C\_sat1=(100)^2*(-1.66*10^(-10) *T11^3+9.42*10^(-8) *T11^2-2.37*10^(-5) *T11+1.89215841*10^(-1)-6.50551574*10^(-2) * PHr+7.51805208*10^(-3) *(PHr^2)-2.89928230*10^(-4) *( PHr^3))^2$   
 $C\_sat2=(100)^2*(-1.66*10^(-10) *T12^3+9.42*10^(-8) *T12^2-2.37*10^(-5) *T12+1.89215841*10^(-1)-6.50551574*10^(-2) * PHr+7.51805208*10^(-3) *(PHr^2)-2.89928230*10^(-4) *( PHr^3))^2$   
 $C\_sat3=(100)^2*(-1.66*10^(-10) *T13^3+9.42*10^(-8) *T13^2-2.37*10^(-5) *T13+1.89215841*10^(-1)-6.50551574*10^(-2) * PHr+7.51805208*10^(-3) *(PHr^2)-2.89928230*10^(-4) *( PHr^3))^2$   
 $C\_sat5=(100)^2*(-1.66*10^(-10) *T15^3+9.42*10^(-8) *T15^2-2.37*10^(-5) *T15+1.89215841*10^(-1)-6.50551574*10^(-2) * PHr+7.51805208*10^(-3) *(PHr^2)-2.89928230*10^(-4) *( PHr^3))^2$   
 $C\_sat7=(100)^2*(-1.66*10^(-10) *T17^3+9.42*10^(-8) *T17^2-2.37*10^(-5) *T17+1.89215841*10^(-1)-6.50551574*10^(-2) * PHr+7.51805208*10^(-3) *(PHr^2)-2.89928230*10^(-4) *( PHr^3))^2$   
 $C\_sat4=(100)^2*(-1.66*10^(-10) *T14^3+9.42*10^(-8) *T14^2-2.37*10^(-5) *T14+1.89215841*10^(-1)-6.50551574*10^(-2) * PHr+7.51805208*10^(-3) *(PHr^2)-2.89928230*10^(-4) *( PHr^3))^2$   
 $C\_sat=(100)^2*(-1.66*10^(-10) *T1^3+9.42*10^(-8) *T1^2-2.37*10^(-5) *T1+1.89215841*10^(-1)-6.50551574*10^(-2) * PHr+7.51805208*10^(-3) *(PHr^2)-2.89928230*10^(-4) *( PHr^3))^2$   
 $PHr=9$

"-----Masa depositada y Masa removida-----"

"masa = masa acumulada, mr = masa removida kg/m2, Cr = coeficiente de remosion"

$masa=((md\_dot-mr\_dot)*time*3600)$   
 $mr\_dot=C\_r1*md\_dot$   
 $C\_r1=(0.00212*V\_max^2)/(lambda\_sal^(0.5)*Psi)$   
 $masa4=((md\_dot4-mr\_dot4)*time*3600)$   
 $mr\_dot4=C\_r14*md\_dot4$   
 $C\_r14=(0.00212*V\_max4^2)/(lambda\_sal^(0.5)*Psi)$   
 $masa5=((md\_dot5-mr\_dot5)*time*3600)$   
 $mr\_dot5=C\_r15*md\_dot5$   
 $C\_r15=(0.00212*V\_max5^2)/(lambda\_sal^(0.5)*Psi)$   
 $masa1=((md\_dot1-mr\_dot1)*time*3600)$   
 $mr\_dot1=C\_r11*md\_dot1$   
 $C\_r11=(0.00212*V\_max1^2)/(lambda\_sal^(0.5)*Psi)$   
 $masa2=((md\_dot2-mr\_dot2)*time*3600)$   
 $mr\_dot2=C\_r12*md\_dot2$   
 $C\_r12=(0.00212*V\_max2^2)/(lambda\_sal^(0.5)*Psi)$   
 $masa3=((md\_dot3-mr\_dot3)*time*3600)$

```

mr_dot3=C_r13*md_dot3
C_r13=(0.00212*V_max3^2)/(lambda_sal^(0.5)*Psi)
masa7=((md_dot7-mr_dot7)*time*3600)
mr_dot7=C_r17*md_dot7
C_r17=(0.00212*V_max7^2)/(lambda_sal^(0.5)*Psi)
Psi=10 "Factor de resistencia a la depositacion"
"-----factor de ensuciamietno-----"
R_s=((md_dot-mr_dot)*3.6*time)/(rho_sal*lambda_sal) {[m^2*°C/W]}
R_s4=((md_dot4-mr_dot4)*3.6*time)/(rho_sal*lambda_sal)
R_s5=((md_dot5-mr_dot5)*3.6*time)/(rho_sal*lambda_sal)
R_s1=((md_dot1-mr_dot1)*3.6*time)/(rho_sal*lambda_sal)
R_s2=((md_dot2-mr_dot2)*3.6*time)/(rho_sal*lambda_sal)
R_s3=((md_dot3-mr_dot3)*3.6*time)/(rho_sal*lambda_sal)
R_s7=((md_dot7-mr_dot7)*3.6*time)/(rho_sal*lambda_sal)
RsT=R_s1+R_s2+R_s3+R_s4+R_s5+R_s+R_s7
"Calculo Espesor Depositado de Incrustacion [m]"
X4=(R_s4*lambda_sal*1000)
X1=(R_s1*lambda_sal*1000)
X2=(R_s2*lambda_sal*1000)
X3=(R_s3*lambda_sal*1000)
X5=(R_s5*lambda_sal*1000)
X6=(R_s*lambda_sal*1000)
X7=(R_s7*lambda_sal*1000)
lambda_sal=0.0015{ [kw/m° C]}
rho_sal=2700 [kg/m^3]
rho=DENSITY(Water,T=30,P=1.03)
mu=VISCOSITY(Water,T=30,P=1.03)

```

## Apéndice 3.

### *Programa en EES para el Diseño y Simulación de la Operación de un EA.*

"Condicionales"

```
function abc(X)
```

```
if (x<10) then CALL warning ('Revise y Modifique las Temperaturas de Entrada al Enfriador de Aire',X)
```

```
abc:=x
```

```
end
```

```
function abd(Y)
```

```
if (y<10) then CALL warning ('Revise y Modifique las Temperaturas de Salida al Enfriador de Aire',Y)
```

```
abd:=y
```

```
end
```

"Datos de la Cd. de Guanajuato"

```
Pb=764.25 [mmHg]
```

```
Tbhm=17.7[°C]
```

```
Tbsm=36.9 [°C]
```

```
Tbsmk=Tbsm+273.15 [K]
```

{Dpm=31 [dias]} "Dias de Operación por Mes"

Dpm=Doa

{Lm=326.4 [kg/s]} "Flujo masico de agua"

Lm=L

L\_dot=277.76 [kg/s] "Flujo máx.."

Pfa=L\*100/L\_dot "Porcentaje de flujo"

dPmax=59.28 [kPa] "dP max"

Pdp=0.0077\*Pfa^2+0.2191\*Pfa+0.3299

dPc=dPmax\*Pdp/100

"Datos del Agua de Enfriamiento. Corriente Caliente"

{Lv=0.328 [m3/s] "Flujo de agua corregido"}

{Tain=45 [°C]}

Tlin=Tain

{Taout=34.4 [°C]}

{Tlout=Taout}

Tlout=48.53 [°C] "Temp. requerida del agua fría"

Qc=L\*cp\_c\*(Tlin-Tlout) "Calor Cedido por el Agua kW"

Qci=Qc/0.2930 "MBH"

Tlout=Tlin-Qeas/((L/Cear)\*Cp\_c) "Temp. salida del agua"

Tcprom=(Tlin+Tlout)/2 "Calculo Tprom del Agua de Enfto."

{Qc=L\*cp\_c\*(Tlin-Tlout) "Calor Cedido por el Agua"}

Lv=L/rho\_c "Flujo volumétrico de agua"

Qge=Lea\*cp\_c\*(Tlin-Tlout) "Calor Ganado por cada EA"

Ceac=Qc/Qeas "Cantidad de EA requeridos"

Cear=Ceac+.059

Qea=Qc/Cear "Capacidad Térmica Requerida de cada EA"

Qeab=Qea\*3401/996.5 "Capacidad Térmica Requerida de cada EA en MBH"

"Propiedades del Fluido Caliente Agua"

cp\_c=Cp(water,T=Tcprom,P=Pb)

k\_c=Conductivity(water,T=Tcprom,P=Pb)

mu\_c=Viscosity(water,T=Tcprom,P=Pb)

rho\_c=density(water,T=Tcprom,P=Pb)

"Datos del Aire de Enfriamiento. Corriente Fría. Suponer Tgout"

{Tgin=36.9 [°C]}

Tfin=Tgin

Tfout=Qeas/(G\*cp\_f) + Tgin "Temp. de salida del aire"

{Tfout=Tain-11}

Tfprom=(Tfin+Tfout)/2 "Calculo Tprom del Aire"

TfpromK=Tfprom+273.15 [K]

"Propiedades del Fluido Frio Aire"

PMf=28.9645 [g/mol] "Peso Molecular del Aire"

cp\_f=1.007 [kJ/kg °C] "de la Bibliografía"

rho\_f=1E-5\*Tgin^2-0.0045\*Tgin+1.2908

"Cálculos de los DTs"

dtmin=10 [°C]

dtain=Tlin-Tfout

dtaout=Tlout-Tfin

"Método MLDT"

dTml=(dtain-dtaout)/LN(dtain/dtaout)

R=(Tlin-Tlout)/(Tfout-Tgin) "factor de Corrección"

S=(Tfout-Tgin)/(Tlin-Tgin)

Ft=(R^2+1)^0.5\*LN((1-S)/(1-R\*S))/((R-1)\*LN((2-S\*(R+1-(R^2+1)^0.5))/(2-S\*(R+1+(R^2+1)^0.5))))

"Factor de Corrección"

dTm=dTml\*0.9

Ac=Qeas/((Uio/1000)\*dTm) "Área de Transferencia Calculada"

"Método NTU"

qmax=G\*Cear\*cp\_f\*(Tlin-Tfin) "Calor Máximo"

e=Qc/qmax "Efectividad"

Cmin=G\*Cear\*cp\_f "C mínimo"

Cmax=L\*cp\_c "C máximo"

Cr=Cmin/Cmax

"1. Flujo Cruzado, 1 paso"

NTU=0.1

ey=(1-EXP((1/Cr)\*(NTU)^0.22\*(EXP(-Cr\*(NTU)^0.78)-1)))

Attc=NTU\*Cmin\*1000/Uio "Área Total de Transf. de Calor por NTU"

"Condicionales dt"

z=abc(dtain)

w=abd(dtaout)

"Calculo Flujo Masico de Agua L"

{L=Lv\*rho\_c}

"Datos del Enfriador de Aire para el Caso de Estudio"

"Tubos"

di = 13.475 [mm] {Diámetro Interior del Tubo}

dim=di\*convert(mm,m)

do = 15.875 [mm] "Diámetro Exterior del Tubo"

dom=do\*convert(mm,m)

$Afs=3.1416*(dim)^2/4$  "Área de Flujo del Serpentín"  
 "Datos del Enfriador de Aire Seleccionado Evapco, Vcoil, Modelo EAVWD9114ZJ"  
 $Nv=14$  "Numero de Ventiladores"  
 $Qeai=3401$  [MBH] "Capacidad Nominal"  
 $Qeas=Qeai*0.2930$   
 $HP=60.1$  [HP] "Potencia nominal de cada Ventilador"  
 $Pnmv=HP*convert(hp, kW)$   
 $Va=250337$  [cfm] "Flujo de Aire"  
 $Vac=Va*convert(cfm, m^3/s)$   
 $Tbs=33.3$  [°C]  
 $TbsK=Tbs+273.15$  [K]  
 $Vam=Vac*TbsmK/TbsK$  "Flujo de Aire Corregido"  
 $G=Vam*rho_f$   
 $Vsi=300$  [gal] "Volumen del Serpentín"  
 $Vs=Vsi*convert(gal, l)$   
 $Npr=4$  "No. de Pasos por Renglón"  
 $Loi=30*12+10+.5$  "Long. Total del EA in"  
 $Lo=Loi*2.54/100$  "Long. Total del EA"  
 $hea=3.118$  [m] "Altura del Banco de Serpentes"  
 $ap=Lo/(Nv/2)$  "Ancho de cada Paquete"  
 $Lea=L/Cear$  "Flujo masico de agua en cada EA"  
 $Lvea=Lv/Cear$  "Flujo volumétrico de agua en cada EA"  
 $Lveah=Lvea*3600$  "m3/h"  
 "Serpentes"  
 $Ls=4*Vs/(3.1416*(di/100)^2*10)$  "Long. Total del Serpentín de cada EA"  
 $Aes=3.1416*(do/1000)*Ls$  "Área Externa Total del Serpentín"  
 $Aet=Aes*Cear$  "Área Total de Transf. de Calor de 3 EA"  
 $\{utm= 2$  [m/s}\} "Velocidad del Agua en los Tubos"  
 $ut=utm$   
 $Afst=Lvea/ut$  "Área de Flujo Total Requerida de cada EA"  
 $NSR=Afst/Afs$  "Cantidad de Serpentes Requeridos por EA"  
 $Nr=NSR/Nv$  "Numero de Serpentes por Paquete"  
 $Nrc=Nr+.59$   
 $Ltp=Ls/Nv$  "Long. de Tubo por Paquete"  
 $Lcs=Ltp/Nrc$  "Long. de cada Serpentín"  
 $Npc=Lcs/Ap+.16$  "Numero de pasos de cada Serpentín"  
 $Nrs=Npc/Npr+.5$  "No. de renglones por serpentín"  
 $Rtp=Nrs*Nrc$  "No. de renglones de tuno por paquete"

Nsp=Nsr/Nv "No. de Serpentine por Paquete"

Nsp1=Rtp/Nrc

"Cálculo de Re, Pr, Nu y hi en los Tubos"

Re=rho\_c\*ut\*dim/mu\_c

Pr=cp\_c\*1000\*mu\_c/K\_c

"Cálculo de la Temp. de Pared (tw)"

"hi y Rfc de la Tabla 12.2, pág. 640 [1]"

"Agua"

hic=4500 [W/°C m<sup>2</sup>]

Rfc=0.000235 [°C m<sup>2</sup>/W]

"Aire"

hif=7500 [W/°C m<sup>2</sup>]

Rff=0.00015 [°C m<sup>2</sup>/W]

Uio=450 [W/m<sup>2</sup> °C]

Ui=Uo

tw=Ui\*(Tfprom-Tcprom)/hic + Tcprom

mu\_tw=Viscosity(water,T=Tw,P=Pb)

mcmtw = mu\_c/mu\_tw

"Parámetros para Nu Pag. 663 Coulson"

C1=0.023

a=0.8

b=0.3

c=0.14

Nut=C1\*Re<sup>a</sup>\*Pr<sup>b</sup>\*mcmtw<sup>c</sup> "No. de Nusselt"

hi=Nut\*K\_c/dim "Coef. de Transferencia de Calor Lado Tubos"

"Cálculo de dP Tubos EA 1 y 2"

RT=0.046 "Rugosidad de la Tubería, Tabla 5.2 pag. 202 [1]"

jf=RT/(rho\_c\*ut<sup>2</sup>) "Factor de Fricción jf"

m=0.14 "Para Ret > 2,100"

dPt=(Npc\*(8\*jf\*(Ap/dim)\*(mcmtw)<sup>(-m) +2.5</sup>\*(rho\_c\*ut<sup>2/2</sup>))/1000

"Lado Aire"

Afla=Hea\*(Lo-Rtp\*dom)\*2 "Área de Flujo Libre Lado Aire EA"

Vf=Vam/Afla "Velocidad de Cara EA"

vnfc=vf\*293/(273+Tfin) "Vel. de Cara Corregida"

ha=218.9\*1000\*vnfc<sup>0.718</sup> "Calculo del Coef. de Transf. de Capa Externa. ha"

"Cálculo de la Velocidad de Flujo Masico (G) y Flujo Masico (Gm) del Aire"

Ga=vf\*rho\_f

Gamax=2\*Ga

### "Calculo dP aire"

f=0.9 "Factor de Fricción"

$dPf=(f*Nv*Gamax^2/(2*rho_f))/1000$

"Consumo de Potencia del Ventilador del EA. Pfc"

efc=0.7 "Eficiencia del Ventilador"

$Pfct=dPf*Vam/(efc)$

$Gsc=Qge/(cp\_f*(Tfout-Tgin))$  "Flujo masico de aire calculado"

$Ppv=0.0025*Pfa^2+0.55*Pfa+20$  "% de potencia del ventilador"

$Ara=Qc*1000*(1/hi+1/ha)/((dtain*dtaout*(dtain+dtaout)/2)^(1/3))$

### "Cálculo de Uo y dU"

$Kw=16 [W/m^2°C]$  "Para ss"

$Uo=(1/ha+1/hi+dom*ln(do/di)/(2*Kw)+do*(1/hic+1/hif)/di)^(-1)$

$dU=(Uo-Ui)*100/Ui$

### "Consumo de Potencia de los EA"

$kWt=Pfct*Cear$  "Potencia Total de 4 EA"

$Ho=Doa*24$  "Horas de operación por mes"

$Cea=Ho*kWt$  "Consumo de Electricidad por mes"

### "Costos"

$Ceea=362 [kUSD]$  "Costo Cotizado del EA"

$Cfea=4778*(Cear*Aes)^0.525/1000$  "Costo Estimado del EA"

$Dcre=(Ceea-Cfea)*100/Ceea$  "Desviación de Costo Real vs. Estimado"

$Cetea=Ceea*Cear$  "Costo Estimado d EA"

$Cei=30 [kUSD]$  "Costo Estimado de la instalación de EA"

$Cti=Cei*Cear$  "Costo Estimado de la instalación de EA"

$Ctp=Cetea+Cti$  "Costo Total Estimado del Proyecto"

$Cee=1.527 [MXN/kWh]$  "Costo de la Electricidad"

$Cce=Cee*Cea/1000$  "Gasto de Electricidad kmxn"

$Tc=20.22 [MXN/USD]$  "Tipo de Cambio"

$Ceu=Cce/Tc$  "Gasto de Electricidad kUSD"

### "dP en Tuberías de Interconexión del EA"

$dGm=0.218 [m]$

$dG=dGm*1000 [mm]$  "diámetro de la tubería G"

$Rr=Rt/dG$  "Rugosidad Relativa"

$AfG=3.1416*dGm^2/4$  "Área de Flujo"

$utt=Lvea/AfG$  "Velocidad en la tubería"

$Ret=rho\_c*utt*dGm/mu\_c$  "Re en la tubería"

$ff=0.0016$  "Factor de fricción"

$Lt=6 [m]$  "Long. de la tubería"



$ht=2.74$  [m] "Altura de la tubería"  
 $Nvc=2$  "Número de válvulas"  
 $Nrcc=2$  "Rdxn. conc"  
 $Nte=2$  "Tees"  
 $gr=9.8$  [m/s<sup>2</sup>] "Aceleración de la gravedad"  
 $dPtu=8*ff*Lt*rho_c*ut^2/(dGm*2)$  "dP 1 Tubería"  
 $Kv=0.15$  "Número de cabezas de velocidad Válvula de Compuerta"  
 $Krc=0.5$  "Redxn Concéntrica"  
 $Kte=1.5$   
 $Ncv=Nvc*Kv+Nrcc*Krc+Nte*Kte$  "Número de cabezas de velocidad total"  
 $Cv=ut^2/(2*gr)$  "Cabeza de velocidad"  
 $PcEA=Ncv*Cv*rho_c*gr$  "Perdida de cabeza"  
 $dPtEAt=(PcEA+dPtu)/1000+dPt$  "Presión total"

## Apéndice 4.

### *Programa en EES para el Diseño y Simulación de la Operación de un CA.*

$Pb=764.25$  [mmHg]  
 $Qt=26473$  [kJ/s] "Carga Térmica Total de la RIC"  
 $Tlout=22$  [°C]  
 $Qr=L*cp_c*(Tlin-Tlout)$   
 $Qrw=Cc*Qcdw$  "Calor intercambiado"  
["Trane, modelo RTAC 350 STD"](#)  
 $Tmlout=50$  [F] "Temp. max. del agua fría de salida del Chiller"  
 $Tmloutc=(Tmlout-32)/1.8$   
 $Qc=350$  [ton] "Capacidad del Chiller RTAC"  
 $Lc=1374$  [gpm] "Flujo de agua del chiller"  
 $Gv=312843$  [m<sup>3</sup>/h] "Flujo Volumétrico de Aire m<sup>3</sup>/h"  
 $Gvs=Gv/3600$  "Flujo Volumétrico de Aire m<sup>3</sup>/s"  
 $Cco=3$  "Cantidad de Compresores"  
 $dPc=19$  [ft H<sub>2</sub>O] "dP del AE"  
 $dPcp=dPc*2989$  "dP del AE en Pa"  
 $Qcd=366.5$  [ton] "Cap. Real del Chiller a las Condiciones de Operación"  
 $Qcdw=Qcd*convert(ton, kW)$   
 $Cch=Qr/Qcdw$  "Cantidad de Chillers Requeridos"  
 $Cc=5$   
 $L_vcg=Lvcc*convert(m^3/s, gpm)$

$C_{cf} = L_{vcg} / L_c$  "Cantidad de Chillers por Flujo"  
 "Agua de Enfriamiento"  
 {Tain=28 [°C]}  
 Tain=Tlin "Temp. de entrada"  
 Tlink=Tlin+273.15 "K"  
 Tproma=(Tlin+Tlout)/2 "Temp. promedio agua"  
 $cp\_c = Cp(\text{water}, T=Tlin, P=Pb)$   
 $\rho\_c = \text{density}(\text{water}, T=Tlin, P=Pb)$   
 $\mu\_c = \text{Viscosity}(\text{water}, T=Tlin, P=Pb)$   
 $k\_c = \text{Conductivity}(\text{water}, T=Tlin, P=Pb)$   
 {Dome=31 [dias]}  
 Dome=Doa "Dias de Operación por Mes"  
 {Lvm=0.261 [m3/s]}  
 Lvm=Lvc "Flujo Volumétrico de AE"  
 $Lvcg = Lvc * \text{convert}(m3/s, gpm)$   
 $L = Lvc * \rho\_c$  "Flujo Masico de Agua"  
 $Lvcc = Lvc / Cc$  "Flujo de Agua por Chiller"  
 $Lmc = L / Cc$  "Flujo masico de agua por chiller"  
 $Tlout = Tlin - Q_{rw} / (L * cp\_c)$  "Temp. de salida del AE"  
 $Tloutf = 1.8 * Tlout + 32$  "F"  
 $Tloutk = Tlout + 273.15$  "K"  
 $Tlinc = Tlout + Q_t / (L * cp\_c)$  "Temp. de entrada del AE corregida"  
 "Aire"  
 $\rho\_f = \text{density}(\text{air}, T=Tfin, P=Pb)$   
 PMf=28.9645 [g/mol] "Peso Molecular del Aire"  
 $cp\_f = (27.435 + 0.00618 * T_{fink} - 0.0000009 * T_{fink}^2) / PMf$   
 $G = G_{vs} * \rho\_f$  "Flujo masico de aire"  
 {Taiin=18.18 [°C]} "Temp. de entrada del aire al condensador °C"  
 Taiin=Tfin  
 $Tfinf = 1.8 * Tfin + 32$   
 $Tfink = Tfin + 273.15$   
 $Tfout = Tfin + Q_{rw} / (G * cp\_f * Cc)$  "Temp. de Salida del Aire"  
 "Consumo de Potencia del Chiller"  
 $kWc = 391.1 - (85 - Tfinf) * 29.7 / 10$  [kW] "Potencia del Chiller"  
 $kWt = kWc * Cc$  "Potencia Total de los Chillers"  
 Hoa=Doa\*24 "Horas de operación por mes"  
 $Cea = Hoa * kWt$  "Consumo de Electricidad por mes"  
 "Costos"

$C_{tr}=475$  [usd/ton] "Costo por Ton del Chiller con VFD"  
 $C_{ec}=C_{tr} \cdot Q_c / 1000$  "Costo Estimado del Chiller con VFD"  
 $C_{chi}=288.13$  [kusd] "Costo del chiller cotizado"  
 $C_{et}=C_{chi} \cdot C_c$  "Costo Estimado de los Chillers con VFD"  
 $C_{ei}=25$  [kusd] "Costo Estimado de la instalación de 1 Chiller con VFD"  
 $C_{ti}=C_{ei} \cdot C_c$  "Costo Estimado de la instalación de 4 Chillers con VFD"  
 $C_{tp}=C_{et}+C_{ti}$  "Costo Total Estimado del Proyecto"  
 $C_{ee}=1.527$  [mxn/kw h] "Costo de la Electricidad"  
 $C_{ce}=C_{ee} \cdot C_{ea} / 1000$  "Gasto de Electricidad mensual kmxn"  
 $T_c=20.22$  [mxn/usd] "Tipo de Cambio"  
 $C_{eu}=C_{ce} / T_c$  "Gasto de Electricidad kusd"  
 "Evaporador del Chiller"  
 "Propiedades del Refrigerante HFC-134a"  
 $N_c=2$  "Numero de Circuitos Independientes"  
 $R_{c1}=209$  [kg] "Carga Refrigerante circuito 1"  
 $R_{c2}=91$  [kg] "Carga Refrigerante circuito 1"  
 $R_{mt}=R_{c1}+R_{c2}$  "Carga Total de Refrigerante"  
 $PE_1=R_{c1} / R_{mt}$  "Porcentajes de carga de cada evaporador"  
 $PE_2=R_{c2} / R_{mt}$   
 "Considerando Condiciones de Operación similares a R13a"  
 $T_{ev}=-15$  [°C] "Evaporador"  
 $T_{evk}=T_{ev}+273.15$  "K"  
 $P_{ev}=164$  [kPa]  
 $k_{re}=0.0145$  [W/m °C]  
 $cp_{re}=Cp(R134a, T=T_{ev}, P=P_{ev})$   
 $\rho_{re}=Density(R134a, T=T_{ev}, P=P_{ev})$   
 $DELTA h_{vap\_re}=Enthalpy\_vaporization(R134a, T=T_{ev})$   
 $\mu_f=Viscosity(R134a, T=T_{ev}, P=P_{ev})$   
 "Evaporador 1"  
 $Q_{rw1}=Q_{rw} \cdot PE_1$  "Carga del Evaporador 1"  
 $R_{tf1}=Q_{rw1} / DELTA h_{vap\_re}$  "Flujo de Refrigerante"  
 $N_p=2$  "No. de pasos por los tubos"  
 $d_i=16.8$  [mm] "diámetro interior de los tubos"  
 $d_o=20$  [mm] "diámetro exterior de los tubos"  
 $A_{f1t}=3.1415 \cdot (d_i / 1000)^2 / 4$  "Área de flujo de 1 tubo"  
 $d_{Tlm}=(T_{link}-T_{loutk}) / \ln((T_{lin}-T_{ev}) / (T_{lout}-T_{ev}))$  "Temperatura Media Logarítmica"  
 $U_i=1640$  [W/m<sup>2</sup> °C] "Coef. Global Inicial Tabla 12.1"  
 $A_{c1}=Q_{rw1} \cdot 1000 / (U_i \cdot d_{Tlm})$  "Área de Intercambio de Calor"

$L_t=1.83$  [m] "Long. de tubo considerada"  
 $A_{e1t}=3.1416*(d_o/1000)*L_t$  "Área Externa de 1 tubo"  
 $N_{tp1}=A_c1/(A_{e1t}*N_p)+.4$  "Cantidad de Tubos Requeridos"  
 $A_{fp1}=N_{tp1}*A_{f1t}$  "Área de flujo de los tubos por paso"  
 $L_1=L_{mc}*PE_1$  "Flujo de agua del evaporador 1"  
 $u_{t1}=L_1/(\rho_{c}*A_{fp1})$  "Velocidad del Agua en los Tubos"  
 $Re_{t1}=\rho_{c}*u_{t1}*(d_i/1000)/\mu_{c}$  "Reynolds en los tubos"  
 $Pr=\rho_{c}*u_{c}*1000/k_{c}$  "Prandtl en los tubos"  
 "his y Rfs"  
 $h_{ic}=4500$  [W/m<sup>2</sup> °C] "Coef. transf. de calor agua"  
 $R_{fc}=0.000235$  [m<sup>2</sup> °C/W] "Coef. ensuciamiento agua"  
 $h_{if}=7500$  [W/m<sup>2</sup> °C] "Coef. transf. de calor refrigerante"  
 $R_{ff}=0.00015$  [m<sup>2</sup> °C/W] "Coef. transf. de calor refrigerante"  
 $t_w=(U_i*(T_{ev}-T_{proma}))/h_{ic}+T_{proma}$  "Temp. de pared"  
 $\mu_{cw}=\text{Viscosity}(\text{water}, T=T_w, P=P_b)$   
 $\mu_{cmucw}=\mu_{c}/\mu_{cw}$   
 "No. de Nusslets Nut"  
 $C=0.023$   
 $a=0.8$   
 $b=0.3$   
 $cm=0.14$   
 $Nu_{t1}=C*Re_{t1}^a*Pr^b*\mu_{cmucw}^{cm}$   
 $h_{i1}=Nu_{t1}*k_{c}/(d_i/1000)$  "Coef. de Transferencia de Calor tubos"  
 "dP Tubos"  
 $R_t=0.0015$  [mm] "Rugosidad de los tubos"  
 $j_{f1}=R_t/\rho_{c}*u_{t1}^2$   
 $m=0.14$  "Para  $Re_t > 2,100$ "  
 $dP_{t1}=N_p*(8*j_{f1}*(L_t/dim)*\mu_{cmucw}^{(-m)+2.5}*\rho_{c}*u_{t1}^2/2)$   
 "Coraza"  
 "Pitch Propuesto Cuadrado"  
 $k_1=0.215$  "1 paso"  
 $n_1=2.207$   
 $pt=3*d_o$  "Pitch mm"  
 $ptm=pt/1000$   
 $dom=d_o/1000$   
 $Db_1=d_o*(N_{tp1}/k_1)^{(1/n_1)}$  "Diámetro del haz de tubos"  
 $Cl_1=89.9$  [mm] "Claro entre haz de tubos y carcaza"  
 $Ds_1=Db_1+Cl_1$  "Diámetro de la Coraza"

$lb1 = Ds1/5$  "Espacio entre baffles Considerado"  
 $As1 = (pt-do) * (Ds1/1000) * (lb1/1000) / pt$  "Área de flujo cruzado de la coraza"  
 $Gs1 = Rtf1 / As1$  "Velocidad másica por área de flujo"  
 $us1 = Gs1 / rho\_f$  "Velocidad en la coraza"  
 $de = 1.27 * (ptm^2 - 0.785 * dom^2) / dom$  "Diámetro Equivalente"  
 $Rec1 = Gs1 * de / mu\_f$  "No. de Reynolds de la coraza"  
 $jh = 0.005$  "Factor de transferencia de calor"  
 $Prf = 1000 * cp\_re * mu\_f / k\_re$  "No. de Prandtl en la coraza"  
 $hc1 = jh * REc1 * Pr^{0.33} * mucmucw^{0.14}$  "Coef. de transf. de calor lado coraza"  
 $jf = 0.003$  "Factor de fricción"  
 $dPc1 = 8 * jf * (Ds1/de) * (Lt/lb1) * rho\_re * us1^2 * mucmucw^{(-0.14)/2}$  "dP lado coraza"  
 $Uo = (1/hc1 + 1/hi1 + dom * ln(do/di) / (2 * kw) + do * (1/hic + 1/hif) / di)^{-1}$  "Coef. Global de transferencia de calor"  
 $dU = 100 * (Ui - Uo) / Ui$  "% desviación de U"  
 $kw = 388$  [W/m°C] "Conductividad del cobre Tabla 12.6"  
**"Evaporador 2"**  
 $Qrw2 = Qrw * PE2$  "Carga del Evaporador 1"  
 $Rtf2 = Qrw2 / DELTAh\_vap\_re$  "Flujo de Refrigerante"  
 $Ac2 = Qrw2 * 1000 / (Ui * dTlm)$  "Área de Intercambio de Calor"  
 $Ntp2 = Ac2 / (Ae1t * Np) + .57$  "Cantidad de Tubos Requeridos"  
 $Afp2 = Ntp2 * Af1t$  "Área de flujo de los tubos por paso"  
 $L2 = Lmc * PE2$  "Flujo de agua del evaporador 2"  
 $ut2 = L2 / (rho\_c * Afp2)$  "Velocidad del Agua en los Tubos"  
**"dP Tubos"**  
 $dim = di / 1000$   
 $dPt2 = Np * (8 * jf1 * (Lt/dim) * mucmucw^{(-m)+2.5} * rho\_c * ut2^2)^{1/2}$   
**"Coraza"**  
**"Pitch Propuesto Cuadrado"**  
 $Db2 = do * (Ntp2/k1)^{(1/n1)}$  "Diámetro del has de tubos"  
 $CI2 = 88$  [mm] "Claro entre haz de tubos y carcasa"  
 $Ds2 = Db2 + CI2$  "Diámetro de la Coraza"  
 $lb2 = Ds2/5$  "Espacio entre baffles Considerado"  
 $As2 = (pt-do) * (Ds2/1000) * (lb2/1000) / pt$  "Área de flujo cruzado de la coraza"  
 $Gs2 = Rtf2 / As2$  "Velocidad másica por área de flujo"  
 $us2 = Gs2 / rho\_f$  "Velocidad en la coraza"  
 $Rec2 = Gs2 * de / mu\_f$  "No. de Reynolds de la coraza"  
 $jh2 = 0.004$  "Factor de transferencia de calor"  
 $hc2 = jh2 * REc2 * Pr^{0.33} * mucmucw^{0.14}$  "Coef. de transf. de calor lado coraza"

$jf2=0.0035$  "Factor de fricción"  
 $dPc2=8*jf2*(Ds2/de)*(Lt/lb2)*rho\_re*us2^2*mucmucw^{(-0.14)/2}$  "dP lado coraza"  
 $Uo2=(1/hc2+1/hi1+dom*\ln(do/di)/(2*kw)+do*(1/hic+1/hif)/di)^{-1}$  "Coef. Global de transferencia de calor"  
 $dU2=100*(-Uo2+Ui)/Ui$  "% desviación de U"  
 "Condensador"  
 "Considerando Condiciones de Operación similares a R13a"  
 $Tco=48.6$  [°C] "Condensador"  
 $Pco=767$  [kPa]  
 $dTin=Tco-Tfin$  "Deltas T"  
 $dTout=Tco-Tfout$   
 $dic=34$  [mm] "d int tubo"  
 $doc=38$  [mm]  
 $dicm=dic/1000$   
 $docm=doc/1000$   
 "Propiedades del Refrigerante a las Condiciones de Operación del Condensador"  
 $K\_rc=0.0824$  [W/m °C]  
 $cp\_rc=1.44$  [kJ/kg °C]  
 $rho\_rc=1206$  [kg/m<sup>3</sup>]  
 $DELTAh\_vap\_rc=Enthalpy\_vaporization(R134a,T=Tco)$   
 $mu\_rc=0.000202$  [kg/m s]  
 $Rtf3=Qrw/(2*DELTAh\_vap\_rc)$  "Flujo de Refrigerante"  
 $dTlmco=-((Tfout-Tfin)/\ln((Tfout-Tco)/(Tfin-Tco)))$  "Temperatura Media Logarítmica"  
 $Cs=8$  "Cantidad de Serpentes"  
 $Ls=6.401$  [m] "Long. de cada serpentín"  
 $Lts=Cs*Ls$  "Long. total de los serpentes"  
 $Npc=3$  "Numero de Pasos del Serpentín"  
 $Asc=Ls/Npc$  "Ancho del Serpentín"  
 $Af1tc=3.1416*dicm^2/4$  "Área de flujo de 1 tubo"  
 $Aets=3.1416*docm*Lts$  "Área Externa Total de los Serpentes"  
 $Rtfs=Rtf3/Cs$  "Flujo masico de refrigerante por serpentín"  
 $Lrs=Rtfs/rho\_rc$  "Flujo volumétrico de refrigerante por serpentín"  
 $urt=Lrs/Af1tc$  "Velocidad del refrigerante en los tubos"  
 $Aflac=56.14$  [m<sup>2</sup>] "Área de Flujo libre"  
 $Retc=rho\_rc*urt*dicm/mu\_rc$  "Reynolds en los tubos"  
 $Prc=1000*cp\_rc*mu\_rc/k\_rc$  "Prandtl"  
 $Tcprom=(Tfin+Tfout)/2$  "TEmp. promedio del aire"  
 $Uic=328$  "Coef. Global de Transf. de Calor Inicial"

$twc=(Uic*(Tcprom-Tco))/hif+Tcprom$  "Temp. de pared"  
 $\mu_{rc}=Viscosity(R134a,T=Tco,P=Pco)$   
 $\mu_{rc}/\mu_{rc}$   
 $Nuc=C*Retc^a*Prc^b*\mu_{rc}^{cm}$   
 $Th=Rtf3/Lts$   
 $gr=9.8$  [m/s<sup>2</sup>] "Aceleración de la gravedad"  
 $hico=0.95*k_{rc}*(\rho_{rc}*(\rho_{rc}-\rho_{re})*gr/(\mu_{rc}*Th))^{0.33}$  "Coef. de Transferencia de Calor tubos"  
**"dP Tubos"**  
 $jfc=Rt/\rho_{rc}*urt^2$   
 $dPtc=Npc*(8*jfc*(Asc/dicm)*\mu_{rc}^{cm}^{(-m)+2.5}*\rho_{rc}*urt^2/2)$   
**"Lado Aire"**  
 $Vfc=Gvs/Aflac$  "Velocidad de Cara"  
 $vnfc=vfc*293/(273+Tfin)$  "Vel. de Cara Corregida"  
 $hac=218.9*1000*vnfc^{0.718}$  "Calculo del Coef. de Transf. de Capa Externa"  
 "Cálculo de la Velocidad de Flujo Masico (G) y Flujo Masico (Gm) del Aire"  
 $Ga=vfc*\rho_f$   
 $Gam=Ga*Aflac$  "Flujo masico de aire"  
 $Gamax=2*Ga$   
**"Calculo dP aire"**  
 $f=0.3$  "Factor de Fricción"  
 $Nv=14$  "No. de Ventiladores"  
 $dPf=(f*Nv*Gamax^2/(2*\rho_f))/1000$   
 "Consumo de Potencia del Ventilador. Pfc"  
 $efc=0.9$  "Eficiencia del Ventilador"  
 $Pfct=dPf*Gvs/(efc)$   
 $Pfcv=Pfct/Nv$  "Potencia de cada Motor"  
**"Cálculo de Uo, dU y Error"**  
 $kwco=385$  [W/°C m] "Conductividad del Cobre"  
 $Uoc=(1/hac+1/hico+docm*\ln(doc/dic)/(2*Kwco)+doc*(1/hif+1/hif)/dic)^{-1}$   
 $dUc=(Uoc-Uic)*100/Uic$   
 "dP en Tuberías"  
 $dGm=0.205$  [m]  
 $dG=dGm*1000$  [mm] "diámetro de la tubería G"  
 $Rr=Rt/dG$  "Rugosidad Relativa"  
 $AfG=3.1416*dGm^2/4$  "Área de Flujo"  
 $utt=Lvcc/AfG$  "Velocidad en la tubería"  
 $Ret=\rho_c*utt*dGm/\mu_c$  "Re en la tubería"

$ff=0.0052$  "Factor de fricción"  
 $Lo=6$  [m] "Long. de la tubería"  
 $ht=0.5$  [m] "Altura de la tubería"  
 $Nvc=2$  "Número de válvulas"  
 $Nrcc=2$  "Rdxn. conc"  
 $Nte=2$  "Tees"  
 $dPtu=8*ff*Lo*\rho_c*utt^2/(dGm^2)$  "dP 1 Tubería"  
 $Kv=0.15$  "Número de cabezas de velocidad Válvula de Compuerta"  
 $Krc=0.5$  "Redxn Concéntrica"  
 $Kte=1.5$   
 $Ncv=Nvc*Kv+Nrcc*Krc+Nte*Kte$  "Número de cabezas de velocidad total"  
 $Cv=utt^2/(2*gr)$  "Cabeza de velocidad"  
 $Pcc=Ncv*Cv*\rho_c*gr$  "Perdida de cabeza"  
 $Ptc=Pcc+dPtu+dPcp$  "Presión total"

**Programa en EES para el Diseño y Costeo de un IC.**

"Condicionales"

```

function abc(X)
if (x>2.5) then CALL warning ('La Velocidad en los tubos es muy alta, se pueden dañar.
Disminuya el número de pasos',X)
if (x<1.5) then CALL warning ('La Velocidad en los tubos es muy baja, Puede Originar
Ensuciamiento. Aumente número de pasos',X)
abc:=x
end
function abe(Z)
if (z>30) then CALL warning ('El Incremento de Temperatura del Agua de Enfriamiento esta Fuera
de Rango. Máx. 30°C. Disminuya el Rango',Z)
abe:=z
end
function abf(W)
if (w>80000) then CALL warning ('La Caída de Presión en los Tubos, se Encuentra Fuera de
Rango. Disminuya el no. de Pasos',W)
abf:=w
end
function abg(Y)
if (y>1) then CALL warning ('La Velocidad en la Coraza es muy alta, se pueden dañar. Revise el
Diseño',Y)

```



```
if (y<0.31) then CALL warning ('La Velocidad en la Coraza es muy Baja, se puede Ensuciar.  
Revise el Diseño',Y)
```

```
abg:=y
```

```
end
```

```
function abh(DU)
```

```
if (DU>30) then CALL warning ('La Desviación de Uo es > 30%. Tome U=Uo y Rediseñe',DU)
```

```
abh:=DU
```

```
end
```

```
"Fluido Frio por los Tubos"
```

```
P_1=130 [kPa]
```

```
{Tce=95 [°C]}
```

```
T1=Tce
```

```
{Tcs=50 [°C]}
```

```
{T2=Tcs}
```

```
Tcprom=(T1+T2)/2
```

```
m_dot_d=43.755 [kg/h]
```

```
{m_dot_co=m_dot_d*convert (kg/h,kg/s)}
```

```
m_dot_c=m_dot_co
```

```
"Propiedades del Fluido Caliente"
```

```
cp_c=Cp(A$,T=Tcprom,P=P_1)
```

```
k_c=Conductivity(A$,T=Tcprom,P=P_1)
```

```
mu_c=Viscosity(A$,T=Tcprom,P=P_1)
```

```
rho_c=density(A$,T=Tcprom,P=P_2)
```

```
"Rf y ho de la Tabla 12.2 Coulson, pag. 640"
```

```
Rfc=0.0002 [m^2°C/W]
```

```
hod=5000 [W/m^2°C]
```

```
"Fluido Caliente Lado Coraza"
```

```
P_2=101 [kPa]
```

```
{Tfe=10 [°C]}
```

```
T3=Tfe
```

```
{Tfs=40 [°C]}
```

```
T4=Tfs
```

```
Tfprom=(T3+T4)/2
```

```
DT_f=T4-T3
```

```
"Restricción 2"
```

```
DTf=abe(DT_f)
```

```
m_dot_F=26.25 [kg/s]
```

```
"Propiedades del Fluido Frio"
```

$$CP\_F=Cp(Y\$,T=Tfprom,P=P\_2)$$

$$\rho_{fm}=\text{density}(Y\$,T=Tfprom,P=P\_2)$$

$$\rho\_f=\text{density}(A\$,T=Tfprom,P=P\_2)$$

$$\mu\_f=\text{Viscosity}(Y\$,T=Tfprom,P=P\_2)$$

$$k\_f=\text{Conductivity}(Y\$,T=Tfprom,P=P\_2)$$

"Rf y hi de la Tabla 12.2 Coulson, pag. 640"

$$R_{ff}=0.00023 \text{ [m}^2\text{°C/W]}$$

$$h_{id}=4500 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

"Balance de Energía "

$$Q\_f=m\_dot\_f*CP\_f*(T3-T4)$$

$$Q\_c=Q\_f$$

$$\{m\_dot\_F=Q\_f/(CP\_F*DT\_f)\}$$

$$T2=Q\_c/(CP\_c*m\_dot\_c)+T1 \text{ "Temp. de salida de los tubos"}$$

$$Q_c=Q\_c*\text{convert(kJ/s,W)}$$

"Cálculo de la MLDT"

$$DT_{lm}=-(((T1-T4)-(T2-T3))/(\ln((T1-T4)/(T2-T3))))$$

"Corrección de la MLDT. DT media. Ft obtenido de la Grafica 12.19"

$$DT_m=Ft*DT_{lm}$$

$$R=(T1-T2)/(T4-T3)$$

$$S=(T4-T3)/(T1-T3)$$

$$\{Ft=0.89\}$$

"Cálculo del Área de Transferencia de Calor del Intercambiador de Calor"

$$A=Q_c/(U*DT_m)$$

"U de la Tabla 12.1 Coulson, pag. 637"

$$\{U=750 \text{ [W/(°C*m}^2\text{)]}\}$$

"Cálculo del Número de Tubos y Velocidad en los Tubos"

"Material de Construcción del Intercambiador de Calor Acero al Carbón"

$$K_w=\text{Conductivity}(K\$, T=DT_m)$$

"Longitud del Tubo"

$$\{L=6.1 \text{ [m]}\}$$

"Diámetro interno"

$$D_i=D_o-2*wt$$

"Diámetro externo"

$$\{D_o=0.02 \text{ [m]}\}$$

"Espesor del Tubo"

$$wt=0.0012 \text{ [m]}$$

"Área Exterior de 1 Tubo"

$$A_{e1t}=\pi*L*D_o$$

"Numero de Pasos por los Tubos"

$$\{N_p=2\}$$

"Cálculo del Número de Tubos por Paso"

$$NTR=(A/(A_{e1t}*N_p))$$

"Cálculo del Área de Flujo de un Tubo"

$$A_{f1t}=(\pi/4)*D_i^2$$

"Área de Flujo Total de todos los Tubos"

$$A_{ft}=NTR*(A_{f1t})$$

"Velocidad del Fluido en los Tubos"

$$u_t=m_{\dot{c}}/(\rho_c*A_{ft})$$

"Condición de Velocidad en los Tubos"

$$g=abc(u_t)$$

"Cálculo del Re, Pr, Nu, hi y tw Lado Tubos"

$$Re_t=\rho_c*D_i*u_t/\mu_c$$

$$Pr=cp_c*(\mu_c*898.87)/k_c$$

$$Nu_s=0.023*Re_t^{0.8}*Pr^{0.3}*(\mu_c/\mu_{ctw})^{0.14}$$

$$h_{ic}=Nu_s*k_c/D_i$$

$$t_w=U*(T_{fprom}-T_{cprom})/h_{ic}+t_{cprom}$$

$$\mu_{ctw}=\mu_c*0.786$$

"Cálculo de jf, valor de RT y dP Tubos, de la tabla 5.2, pag. 202 Coulson"

$$RT=0.046 \text{ [mm]}$$

$$j_f=RT/\rho_c*u_t^2$$

$$DP_t=N_p*(8*j_f*(L/(D_i*1000))*(\mu_c/\mu_{ctw})^{0.14+2.5}*\rho_f*u_t^2/2)$$

$$w=abf(DP_t)$$

"Cálculo del Diámetro de la Coraza"

"Arreglo Triangular de los Tubos Pitch 1.25 Do. Coulson tabla 12.4 pag. 649"

$$p_t=1.25*(D_o*1000)$$

$$K_1=0.158$$

$$n_1=2.263$$

"Diámetro del haz de Tubos"

$$D_b=D_o*1000*(NTR*N_p/K_1)^{(1/n_1)}$$

"Cabezal Flotante Full Through, fig. 12.20 Coulson, pag. 646"

$$C_I=87 \text{ [mm]}$$

$$D_s=D_b+C_I$$

"Espacio entre Baffles. lb, considere Ds/5"

$$l_b=D_s/5$$

"Área de Flujo Cruzado de la Coraza. As"

$$A_s=(p_t-D_o*1000)*(l_b/1000)*(D_s/1000)/p_t$$

"Velocidad Másica y Lineal"

$$Gs=m\_dot\_f/As$$

$$us=Gs/rho\_f$$

"Restricción de la Velocidad de la Coraza"

$$u\_s=abg(us)$$

"Ref y dPf de la Coraza"

$$De=1.27*((pt/1000)^2-0.785*(Do)^2)/(Do)$$

$$Ref=Gs*de/mu\_f$$

$$Prf=cp\_f*mu\_f*0.8/(k\_f*mu\_f)$$

"De la fig. 12.29 se obtiene jh"

$$jh=0.0056$$

$$hs=jh*Ref*Prf^0.33*k\_f/de$$

"De la fig. 12.30 se obtiene jf"

$$jff=0.65$$

$$DPc=8*jff*(Ds/1000/de)*(L/lb)*rho\_f*us^2/2$$

"Cálculo de Uo"

"De la tabla. 12.6 se obtiene kw"

$$1/Uo=1/hs+1/hic+(Do/1000)*ln(Do/Di)/(2*kw)+Do/(Di*hid)+Do/(Di*hod)$$

"Desviación de Uo"

$$DUo=(Uo-U)*100/U$$

$$DUoc=abh(DUo)$$

"Costo del IC"

"Sinnott 2006"

$$C\_IC2004=-0.0005*A^2+0.4313*A+3.9615 \text{ "Costo IC 2004"}$$

$$f\_p=1 \text{ "Factor de presión"}$$

$$f\_t=1 \text{ "Factor tipo cabeza flotante"}$$

$$lc\_2004=143.7 \text{ "Índices de costos"}$$

$$lc\_2014=204.9$$

$$lc\_2022=289.4$$

$$C\_IC2022=C\_IC2004*lc\_2022/lc\_2004$$

"Towler & Sinnott Método Factorial 2010"

$$C\_IC2014TS=0.67*A+3.9 \text{ "usd"}$$

$$C\_IC2022TS=C\_IC2014TS*lc\_2022/lc\_2014$$

"Tourton 2001 Costo Modular"

$$C\_IC2014T=0.65*A+3.8 \text{ "usd"}$$

$$C\_IC2022T=C\_IC2014T*lc\_2022/lc\_2014$$

"Aspen Capital Cost Estimation. ACCE 2011"

$$C\_IC2014A=0.41*A+4.3 \text{ "usd"}$$

C\_IC2022A=C\_IC2014A\*Ic\_2022/Ic\_2014