



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
Carrera de Ingeniería Química



**EMPLEO DE LA METODOLOGÍA DEL
GRADIENTE HIDRÁULICO PARA LA SOLUCIÓN
DE REDES CERRADAS DE DISTRIBUCIÓN DE
FLUIDOS INCOMPRESIBLES POR MEDIO DE
MATLAB**

TESIS

Que para obtener el grado de:

Ingeniero Químico

Presenta

Ramírez Sánchez Fernando

Director del trabajo.

M. en C. Villar Marín Víctor Hugo



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Que tu corazón se enderece: aquí nadie vivirá para siempre”.

- Nezahualcóyotl.

“Amo al que hace de su virtud su afán y fatal destino; pues por su virtud quiere seguir con vida y no quiere vivir más”.

- Friedrich Nietzsche.

“No hay mayor motivación que el saber que aquellos a quien quieres y admiras esperan algo de ti”.

- Fernando Ramírez.

Agradecimientos

A mis padres, por ser las personas que son, y que con todo su cariño y consejos me han dado lo más valioso que tengo ahora.

A mi tutor, por su apoyo y por inspirarme con su persona.

A mis amigos, que me han aportado esencial alegría.

Índice

Índice de figuras	6
Índice de tablas	8
Resumen	9
Introducción.....	10
Objetivo y alcance	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos	13
Alcance	13
1. Generalidades	14
1.1 Redes de tuberías	14
1.1.1 Redes abiertas	16
1.1.2 Redes cerradas	17
1.2 Métodos de análisis de redes de tuberías	18
1.3 Ecuación de conservación de la masa.....	21
1.4 Ecuación de conservación de la energía	22
1.5 Pérdidas de carga en tuberías	24
1.5.1 Ecuación de Bernoulli.....	24
1.5.2 Ecuaciones de fricción en tuberías.....	25
1.5.3 Ecuación de Darcy-Weisbach	25
1.5.4 Factor de fricción de Darcy.....	26
1.5.5 Pérdidas de carga localizadas.....	27
1.6 Ganancia de carga (Turbomáquinas)	29
1.6.1 Cavitación	30
1.7 Qué es un fluido	32
1.8 Viscosidad de gases.....	32
1.8.1 Método de Lucas.....	34
1.9 Distribución de refrigerantes.....	35
1.9.1 Transferencia de calor	35
1.9.2 Refrigerantes	36

1.10 Método seleccionado (Método del Gradiente hidráulico)	38
1.10.1 Descripción matemática.....	39
1.11 MATLAB	43
1.12 Microsoft Excel.....	44
Desarrollo	46
2.1 Descripción del proceso iterativo.....	46
2.2 Interfaz de usuario.....	47
2.3 Desarrollo del código.....	51
2.4 Base de datos.....	59
3. Casos de estudio	61
4. Conclusiones	70
Referencias.....	71
5. Anexos	74

Índice de figuras

Figura 1. Ejemplo de una red de distribución abierta	17
Figura 2. Ejemplo de una red de distribución abierta	18
Figura 3. Red cerrada. Caudales consumidos en los nodos y caudales de alimentación a la red. .21	
Figura 4. ley de conservación en los nodos	22
Figura 5. Convenio de signos para la dirección del flujo y pérdida de carga en las tuberías	23
Figura 6. Vista seccionada de una bomba centrífuga.....	29
Figura 7. Deformación de un fluido debido a un esfuerzo cortante.....	32
Figura 8. Primera sección de la interfaz de usuario (Datos de las tuberías que conforman la red). ... 48	
Figura 9. Segunda sección de la interfaz de usuario (Datos de la red de tuberías).....	48
Figura 10. Tercera sección de la interfaz de usuario (Datos de las cargas conocidas en la red de tuberías).....	49
Figura 11. Cuarta sección de la interfaz de usuario (Datos de las cargas desconocidas en la red de tuberías).....	50
Figura 12. Quinta sección de la interfaz de usuario (Datos de las bombas presentes en la red de tuberías).....	50
Figura 13. Base de datos	60
Figura 14. Red caso 1 (red de tuberías con pérdida de carga por fricción en una válvula).	61
Figura 15. Dirección del flujo en las tuberías de la red caso 1.	62
Figura 16. Datos de las tuberías que componen la red caso 1.	63
Figura 17. Datos generales de la red caso 1.....	63
Figura 18. Cargas conocidas en la red caso 1.	63
Figura 19. Cargas desconocidas, demandas y resultados de las cargas calculadas para la red caso 1.....	64
Figura 21. Datos de las tuberías que componen la red caso 2.	66
Figura 22. Datos generales de la red caso 2.....	66
Figura 23. Cargas conocidas en la red caso 2.	66
Figura 24. Cargas desconocidas, demandas y resultados de las cargas calculadas para la red caso 2.....	67

Figura 25. Datos de las tuberías que componen la red caso 2 descartando la diferencia de altura entre los nodos.	67
Figura 26. Datos de las tuberías que componen la red caso 2 descartando ΔZ 's entre los nodos y corrigiendo direcciones de flujos.	68
Figura 27. Cargas desconocidas, demandas y resultados de las cargas calculadas para la red caso 2 descartando ΔZ 's entre los nodos.	68

Índice de tablas

Tabla 1. Métodos para estimar la viscosidad de gases a bajas presiones	34
Tabla 2. Refrigerantes más usados a nivel mundial	38
Tabla 3. Diferencia porcentual entre los flujos calculados y esperados para la red de tuberías caso 1.	64
Tabla 4. Diferencia porcentual entre las cargas calculadas y esperadas para la red de tuberías caso 1.	65
Tabla 5. Diferencia porcentual entre el flujo calculado al considerar ΔZ 's entre los nodos y al no considerarlas en red de tuberías caso 2.....	69
Tabla 6. Diferencia porcentual entre la carga calculada al considerar ΔZ 's entre los nodos y al no considerarlas en red de tuberías caso 2.....	69

Resumen

El solucionar una red de tuberías consiste en determinar la presión, carga o energía en cada punto de suministro de la red (llamados tomas) y en determinar los caudales y las caídas de presión en cada tubería de la red; Mientras que en una red de tuberías abierta, esto se puede lograr con ecuaciones algebraicas independientes entre sí, en una red de tuberías cerrada, es necesario emplear métodos iterativos que dependen de parámetros estimados iniciales para resolver todas las ecuaciones involucradas de manera simultánea.

En el presente trabajo se empleó la plataforma de programación MATLAB, para desarrollar el método de solución de redes de tuberías cerradas con el mejor desempeño y la mayor versatilidad que existe actualmente, el método del gradiente hidráulico. La programación de este método es capaz de solucionar redes de tuberías con la misma precisión que los software comerciales, y sumado a ello, es capaz de evaluar parámetros importantes que comúnmente se encuentran en las redes de tubería, y que al no considerarse, se suelen obtener resultados alejados de la realidad. Dichos parámetros son, la diferencia de altura entre los nodos de la red, y la existencia de múltiples reservorios y/o bombas hidráulicas en la red.

Introducción

De manera general se puede definir una red como un grupo o sistema de personas o cosas interconectadas. Esta palabra se suele utilizar de manera conceptual como en “redes humanas” o “redes de mercado” (entre otras), y de manera física, abarcando esta última distintos niveles de la materia, empezando por ejemplo por las redes neuronales, pasando por las redes de telecomunicación, hasta las redes de las cuencas hidrográficas que conforman el mundo.

Por la complejidad de lo anterior, hoy en día no es posible llegar a un núcleo común de conocimiento sobre las redes, es decir, el contenido de la ciencia de redes, es un desafío significativo, no obstante, se sabe que en todo sistema el cambio de uno sus elementos afecta a los demás, y con esto, al sistema completo, generando patrones predecibles de comportamiento pudiendo llegar así a una descripción completa del mismo, por tanto, el estudio de fenómenos físicos, biológicos y sociales como representaciones de red, conducen a modelos predictivos de estos fenómenos.

Un tipo de red muy importante dentro de las ciudades y las industrias, son las redes de distribución, las cuales están compuestas por una serie de tuberías conectadas por nodos y por componentes como válvulas, bombas, depósitos, y demás. Mediante estos elementos, suministran la cantidad de agua o cualquier otro fluido requerido para satisfacer una demanda a una presión requerida.

Una de las aplicaciones mas importantes que se le suele dar a los fluidos distribuidos por las redes de distribución, es el de la refrigeración o calentamiento, dado que estos procesos se encuentran y tienen un papel importante en un sinnúmero de problemas industriales y ambientales. Por ejemplo, considérese el área de producción y conversión de la energía. No hay una sola aplicación en esta área que no implique procesos de calentamiento y refrigeración

(Incropera, 2006), y en similar medida, podemos encontrar estos procesos en los procesos industriales del área de los alimentos, químicos, los medicamentos, etc.

Si bien, para el análisis de una red de distribución siempre se sigue el mismo procedimiento una vez escogido un método, no se puede usar una misma red de distribución para suministrar cualquier fluido (especialmente los refrigerantes) a cualquier flujo de manera improvisada, sino que se requiere de un diseño, e incluso de un método de diseño particular según el flujo y el tipo de fluido que se maneje.

Como se podrá intuir, los conceptos de análisis y diseño comprenden amplias diferencias en la ingeniería hidráulica. Cuando se realiza el diseño de una red, el objetivo es obtener la configuración del sistema de conducciones y sus dimensiones para conseguir un estado hidráulico determinado. Por otra parte, cuando lo que se pretende es analizar (o resolver) una red, el problema consiste en conocer el estado hidráulico de dicha red para unas condiciones de funcionamiento y requerimientos determinados, es decir que al contar con cierta configuración en la red (incluyendo repertorios y accesorios), y al requerir cierto suministro en las salidas de esta, se deberá determinar las alturas piezométricas en los nodos desconocidos, así como los valores de caudal que circula por las tuberías.

El resolver una red de distribución consiste en realizar una descripción de estas mediante el análisis de sus componentes. Para llegar a dicha descripción, basta con conocer algunas de las variables en sus elementos, pudiendo ser estas puntuales (como el caudal), o distribuidas (como la presión) (Granados, 2016). Estas variables se relacionan mediante una ecuación homogénea, y dado que dichas variables son diferentes en cada nodo y tubería de la red, existirán tantas ecuaciones como nodos y tuberías, generando un sistema de ecuaciones que se podrá resolver de distintas maneras.

Existen distintos métodos numéricos para resolver los sistemas de ecuaciones que describen una red de tuberías, sin embargo, estos se resuelven de manera iterativa, y como se mencionó antes,

involucran tantas ecuaciones como el número de nodos y tuberías que existan en la red. Por ello, y con el avance tecnológico actual, se ha desarrollado una notable cantidad de software para su solución. Los métodos más recientes, como el método de nodo simulado, el método de bucle simultáneo, el método lineal y el método de gradiente (descritos más adelante), utilizan formulaciones matriciales del problema de la red para aprovechar toda la potencia de las computadoras modernas (Ramalingam et al., 2002)

A pesar de la existencia actual de diversos softwares de pago y de dominio público, que ofrecen amplias herramientas para modelar redes de distribución con vastos componentes y a distintas condiciones, sigue siendo necesario desarrollar herramientas matemáticas y computacionales, de manera que se puedan manipular a conveniencia y/o se puedan emplear para cubrir las necesidades particulares.

Objetivo y alcance

Objetivo general

Desarrollar un código (script) en la plataforma de programación MATLAB para resolver redes de distribución de líquidos o gases a una fase. Dicho código será vinculado a la hoja de cálculo Microsoft Excel, la cual será empleada a manera de interfaz de usuario, esto para facilitar el uso del código y presentar resultados fácilmente interpretables.

Objetivos específicos

- Realizar la selección más adecuada del método de solución de una red de distribución.
- Desarrollar un código que únicamente requiera datos de una red de distribución de líquidos o gases para resolverla.
- Desarrollar una interfaz de usuario donde se suministren los datos de entrada del código.
- Desarrollar una base de datos que facilite el suministro de propiedades de algunos líquidos y gases.
- Aplicar el código desarrollado a distintos casos de estudio previamente resueltos para corroborar su fidelidad.

Alcance

El código desarrollado tendrá la capacidad de:

- Determinar los flujos en las tuberías de una red de distribución y la carga en sus nodos de manera automática (Únicamente suministrando los datos necesarios).
- Considerar las pérdidas de carga por fricción debido a longitud de tramo recto, accesorios y diferencia en la altura de piso terminado, para la resolución de la red.
- Considerar la existencia de distintos reservorios y bombas hidráulicas en la red.

Generalidades

1.1 Redes de tuberías

Una red de distribución es el conjunto de tuberías interconectadas, estructuras y distintos tipos de accesorios que conducen agua o cualquier otro fluido desde tanques de distribución, hasta las tomas donde existe una demanda de dicho fluido. Su finalidad es transportar un fluido a presión hasta proporcionarlos a los usuarios para uso doméstico, público, comercial, industrial entre otros.

Una red de tuberías se compone de distintos elementos, entre los que se pueden identificar todos o algunos de los siguientes (CONAGUA, 2017):

Tuberías: Una tubería o también llamadas cañerías es un conducto que tiene la función de transportar generalmente agua o cualquier otro fluido. Se suele elaborar con materiales muy diversos. Según el fluido que transporte, puede llamarse de distintas formas, como “oleoducto” cuando el fluido que transportan es petróleo o gasoducto cuando el fluido transportado es gas.

A la tubería que conduce el fluido desde el tanque de regulación hasta el punto donde inicia su distribución se le conoce como línea de alimentación. Después de este punto la red de distribución está formada por un conjunto de tuberías que se unen en diversos puntos denominados nodos o uniones.

Accesorios de conexión o especiales: Se refieren a todos los complementos utilizados para realizar conexiones, puntos de cruce, desvíos, ajustes de diámetro, conexiones entre tuberías de distintos materiales o diámetros, y extremos de conductos, entre otros elementos. Ejemplos de estos elementos incluyen uniones, reducciones, T's de derivación, Y's de derivación, codos, cruces rectas y reductoras entre otros.

Válvulas: se trata de un mecanismo que permite o interrumpe el paso de un fluido mediante una pieza móvil que puede abrirse o cerrarse en un conducto. Su clasificación se basa en su función y se divide en dos categorías:

1. Válvulas de aislamiento o seccionamiento, las cuales se emplean para separar o interrumpir el flujo en tramos específicos de tuberías, bombas y dispositivos de control, con el propósito de realizar inspecciones o reparaciones;
2. Válvulas de control, utilizadas para regular el caudal o la presión, facilitar la entrada de aire o la salida de sedimentos, así como liberar aire atrapado en el sistema.

Tomas: Se trata de conexiones especiales implementadas en determinados puntos de la red de tuberías para suministrar el fluido en lugares específicos según sea necesario. En estos puntos de conexión, es posible acoplar diversos elementos que se consideran externos a la red, como bombas, tuberías, mangueras, hidrantes, entre otros.

Tanques de distribución: Consisten en depósitos ubicados típicamente antes de la red de distribución, destinados a almacenar el fluido que se distribuirá con el fin de regular el proceso de distribución o anticiparse a posibles interrupciones en el suministro. Algunos de estos tanques pueden desempeñar ambas funciones simultáneamente.

Bombas hidráulicas: Una bomba hidráulica se define como una máquina capaz de convertir la energía con la que se activa (usualmente mecánica o eléctrica) en energía del fluido incompresible que impulsa. Este fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos. Estas bombas se instalan comúnmente en puntos intermedios de una línea de conducción y ocasionalmente dentro de la red de distribución, con el propósito de aumentar la carga hidráulica en su ubicación y garantizar la circulación del agua en las tuberías.

Cajas rompedoras de presión: Se refieren a depósitos con superficie libre del fluido transportado, de volumen relativamente reducido. Estos permiten que el flujo de una tubería se descargue en ellos, eliminando así la presión hidrostática y estableciendo un nuevo nivel estático aguas abajo. Por lo general, se emplean cuando el terreno por el que transcurren las tuberías presenta depresiones muy profundas, generando cargas hidrostáticas elevadas y, como consecuencia, exigiendo la instalación de tuberías más gruesas y costosas.

1.1.1 Redes abiertas

La red de distribución en configuración abierta está constituida por tuberías que se ramifican de manera que no forman círculos o circuitos, adoptando una estructura similar a la de un árbol. Este tipo de red se distingue por contar con una tubería principal de distribución (la de mayor diámetro), desde la cual se desprenden ramales que culminan en puntos sin conexiones con otras tuberías dentro de la misma red de distribución.

Esta disposición de la red de distribución se elige cuando la topografía del terreno presenta irregularidades que dificultan la formación de circuitos, o cuando la zona de suministro es pequeña o dispersa. Una ventaja destacada de las redes abiertas es su instalación más económica, y en términos de cálculos, su resolución es directa, limitándose al cálculo de las pérdidas en cada tubería para los flujos en tránsito, con el fin de obtener posteriormente los valores de carga y presión en cada nodo.

No obstante, este tipo de red presenta desventajas, como la posibilidad de formación de crecimientos bacterianos y sedimentación en los extremos muertos. Además, en caso de reparaciones debido a fallas o roturas en alguna de las tuberías que la componen, será necesario interrumpir el servicio a todos los usuarios atendidos desde las tuberías aguas abajo de la rotura durante la realización de la reparación necesaria. En el caso de ampliaciones, la presión en los extremos tiende a ser baja.

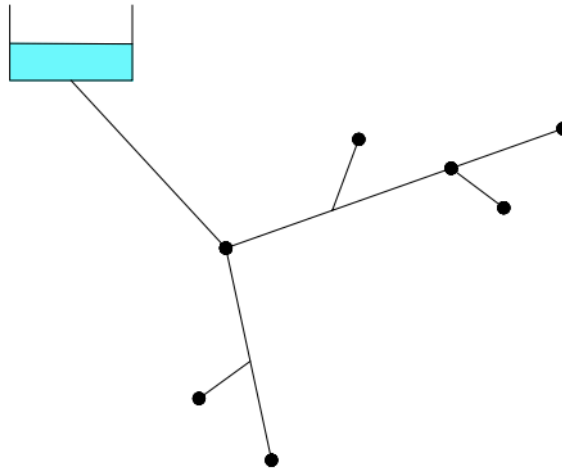


Figura 1. Ejemplo de una red de distribución abierta

1.1.2 Redes cerradas

Las redes de tuberías cerradas, se caracterizan principalmente por contar con al menos un circuito cerrado en su estructura. El propósito es establecer un sistema de tuberías redundante, donde cualquier área dentro de la cobertura del sistema pueda ser accesible simultáneamente mediante múltiples tuberías. La principal ventaja de este tipo de red radica en que su configuración resulta ser la más eficiente y garantiza la prestación del servicio. En caso de que alguna tubería sufra daño o ruptura, se minimizará el impacto en la cantidad de usuarios de la red al crear rutas alternativas para el flujo del fluido a través de las tuberías restantes que componen la red.

Por su eficiencia y confiabilidad, este tipo de red es el más utilizado, sin embargo tiene las desventajas de tener un mayor costo económico, y que para su análisis o resolución, es necesario

realizar el balance de los caudales en tránsito en las tuberías, generando un análisis de mucha mayor complejidad que en el caso de las redes abiertas, razón por la cual es necesario recurrir a métodos iterativos para su análisis.

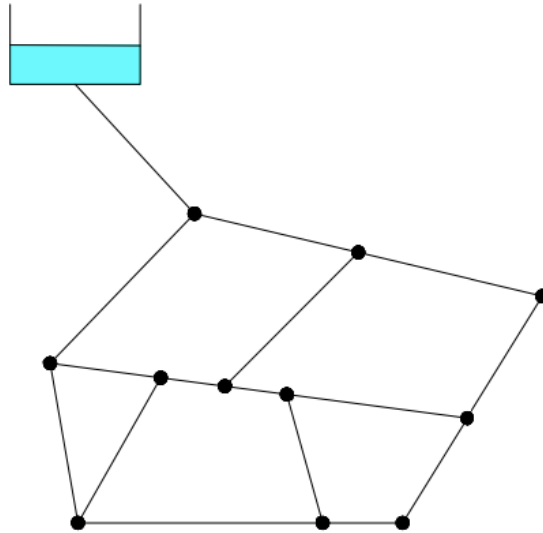


Figura 2. Ejemplo de una red de distribución abierta

1.2 Métodos de análisis de redes de tuberías

En los últimos 80 años, diferentes métodos numéricos han sido usados (y siguen empleándose) para estimar los caudales y presiones en redes de distribución de agua. Estos métodos van desde aproximaciones gráficas basadas en analogías físicas, métodos numéricos iterativos simples hasta complejas organizaciones matriciales para la resolución numérica de sistemas de ecuaciones no lineales (Gutierrez, 2011).

El desarrollo de los métodos mencionados hasta sus últimos avances se puede englobar en 5 periodos. Estos son:

- I. 1839 - 1938: Desarrollo de los fundamentos teóricos y experimentales sobre mecánica de fluidos basados en las leyes de conservación de la energía y/o en observaciones empíricas. Dentro de estos fundamentos se encuentran las ecuaciones para calcular las pérdidas de carga por fricción en tuberías, la definición del número de Reynolds (O. Reynolds, 1883) y la formulación de ecuaciones para la determinación del factor de fricción en la fórmula de Darcy.
- II. 1936 - 1950: Desarrollo de los métodos gráficos para análisis de redes hidráulicas, encabezado por el ingeniero estructural de la Universidad de Illinois Hardy Cross (1885 - 1959), que desarrolló un método matemático para resolver un análisis de distribución de momentos en estructuras metálicas y posteriormente se dió cuenta de que podría ser aplicado para resolver redes de distribución de agua (Jeppson, 1974).
- III. 1950 - 1960: En esta década se empezaron a comercializar los primeros equipos de computo, lo que permitió su implementación para analizar redes de distribución de agua y el desarrollo de software especializado, mediante el cual se consiguió ofrecer servicios de ingeniería para el análisis de redes de distribución mediante herramientas computacionales.
- IV. 1962 - 1987: Conocidas las limitaciones del método de Hardy Cross, y valiéndose de la llegada de la tercera generación de computadoras (1964 - 1971), diferentes investigadores empezaron a desarrollar nuevos métodos para el análisis de redes hidráulicas que además de tener menos limitaciones que el método Hardy Cross, permitieron resolver de manera simultánea una red completa de tuberías y más tarde implementar elementos como bombas y válvulas en la red.
- V. 1980 - Actualidad: Muchos de los softwares desarrollados como parte de investigaciones en las décadas anteriores fueron convertidos en aplicaciones y comercializados, que en paralelo a la introducción del computador personal al público en general que a partir de 1981, hizo posible el llevar las metodologías de análisis a equipos de escritorio, incrementando la oferta

de este tipo de software, permitiendo encontrar opciones con facilidad de uso, interfaz gráfica, diversidad de herramientas etc.

Los métodos de análisis de redes de distribución más significativos que abarcan un periodo de desarrollo de más de 5 décadas son los siguientes:

- 1936: Método de Hardy Cross
- 1962: Método del Nodo Simultáneo (Conocido también como el método clásico de Newton Raphson)
- 1970: Método del Circuito Simultáneo
- 1972: Método de la Teoría Lineal
- 1988: Método del Gradiente Hidráulico (Conocido también como Método de la Red Simultánea)

Independientemente de la red que se analice, del método de resolución que se utilice, y de la manera en que este se resuelva, existen dos características que siempre se van a cumplir y en las cuales se basan todos estos métodos, estas características son: la ecuación de conservación de la masa en los nodos y la ecuación de conservación de la energía aplicadas a un flujo incompresible a través de un sistema a presión.

1.3 Ecuación de conservación de la masa

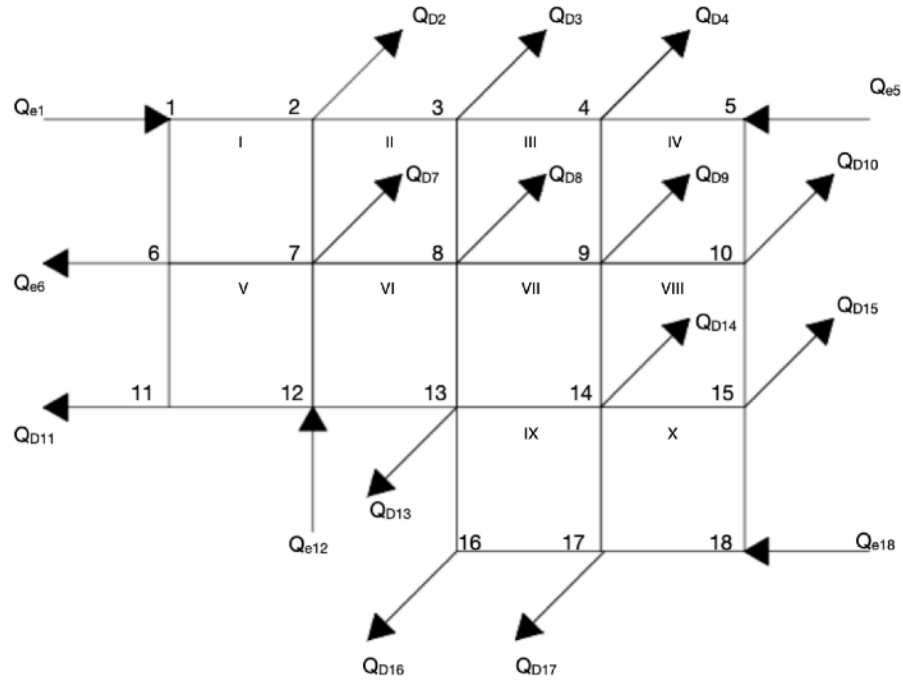


Figura 3. Red cerrada. Caudales consumidos en los nodos y caudales de alimentación a la red.

Tomando en consideración la red de tipo cerrada mostrada en la figura 1, y se tiene en cuenta que Q_{D1} , Q_{D2} , Q_{D3} , ..., Q_{DNu} representan los caudales gastados en cada uno de los nodos, que algunos de los cuales podrían ser nulos en un momento cualquiera, y que Q_{e1} , Q_{e2} , Q_{e3} , ..., Q_{em} son los caudales de entrada que alimentan la red de distribución, se puede establecer la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^m Q_{ei} = \sum_{i=1}^{Nu} Q_{Di} \quad \dots(1)$$

Donde m es el número de alimentaciones y Nu es el número de nodos en la red.

La ecuación 1 describe la conservación de la masa total para la red, sin embargo, se puede desarrollar de una manera similar una ecuación para cada uno de los nodos, dicha ecuación es:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} = 0 \quad \dots(2)$$

Donde NT_i es el número de tuberías que llegan al tubo i, Q_{ij} es es caudal que pasa por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j, y Q_{Di} es el caudal que sale del nodo i.

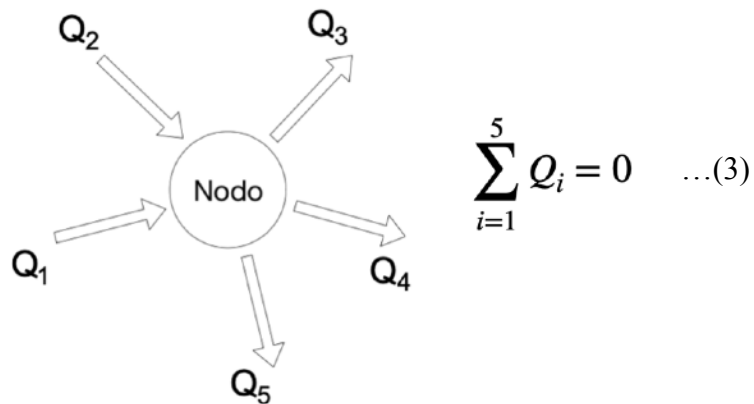


Figura 4. ley de conservación en los nodos

1.4 Ecuación de conservación de la energía

Esta ley enuncia que si se suman las pérdidas de carga alrededor de un circuito cerrado más las generadas por bombas hidráulicas en el mismo circuito, al llegar al punto inicial del circuito la pérdida de carga neta es igual a cero. Matemáticamente, el principio de energía da un número “L” ecuaciones de la forma. Esto se explica por el hecho de que si por un lado del circuito hay menos fricción, el flujo se dirigirá hacia ese lado, esto causará que exista más fricción de la que había, y se igualara la pérdida de carga en ambos lados del circuito; Con el fin de simplificar este análisis, se establece el acuerdo de que al emplear la ecuación de la ley de conservación de la energía, las pérdidas de carga en las tuberías, cuyo flujo sigue la dirección de las manecillas del

reloj, se toman como valores positivos. En contraste, si el flujo va en sentido contrario, estas pérdidas se consideran negativas, aplicando la misma lógica a la dirección del flujo en sí.

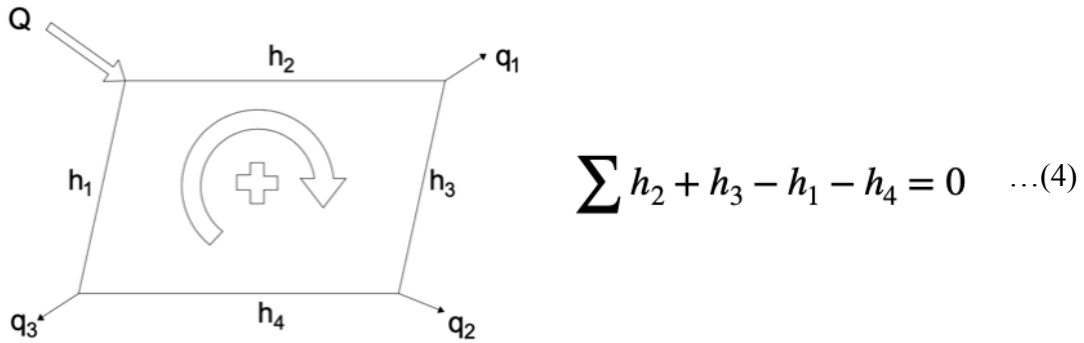


Figura 5. Convenio de signos para la dirección del flujo y pérdida de carga en las tuberías

$$\sum_{j=1}^{NT_I} h_{fij} - H_{ij} = 0$$

$$\sum_{j=1}^{NT_{II}} h_{fij} - H_{ij} = 0$$

.

.

.

$$\sum_{j=1}^{NT_L} h_{fij} - H_{ij} = 0 \quad \dots(5)$$

Donde:

h_{ft} = Pérdida de carga en la tubería j del circuito i

H_{ij} = Ganancia de carga en el la tubería j del circuito i

L = representa el número de bucles o circuitos no superpuestos en la red y cada una de las sumatorias es aplicada a las tuberías en los circuitos I, II, ..., L de la red de la figura 1.

1.5 Pérdidas de carga en tuberías

1.5.1 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli se considera como una de las expresiones teóricas más valiosas en el campo de la hidrodinámica. Esta ecuación establece una relación entre la presión, la velocidad y la altura en el contexto de un flujo estacionario de un fluido incompresible y no viscoso, donde se desprecia la transferencia de calor, específicamente en un canal de flujo. Es llamada ecuación de Bernoulli, dado que fue formulada de forma muy vaga (en palabras) en un libro de texto por Daniel Bernoulli (1700 - 1782) en 1738, aunque la deducción completa se debe a Leonhard Euler, en 1755 (White, 2010).

La ecuación de Bernoulli es la siguiente:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 = Cte. \quad \dots(6)$$

Donde V representa la velocidad del fluido, P la presión del fluido, ρ la densidad del fluido, g la aceleración del fluido debido a la gravedad, y h la altura de la tubería en un punto dado.

De acuerdo con esta ecuación, se puede observar lo siguiente: para que exista una diferencia de presión hidrostática, es necesario que haya una variación en la velocidad del fluido (posiblemente cambiando el área transversal de flujo a lo largo del canal) o en la altura del canal de flujo. En este documento, el caso de mayor interés es el último, y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\Delta P = \rho g \Delta Z \quad \dots(7)$$

Donde ΔP representa la diferencia de presión del fluido, y ΔZ la diferencia de altura del mismo.

1.5.2 Ecuaciones de fricción en tuberías

Para transportar un fluido desde un lugar a otro, se requiere calcular primero la energía necesaria para ello, sin embargo existe una fuerza que impide el movimiento del fluido, la cual es denominada fricción, esto representa una conversión de energía por unidad de peso en una forma de energía no recuperable. Por lo anterior, es necesario adicionar energía extra al fluido de manera que aún con las pérdidas, este logre ser transportado al lugar deseado con la energía (carga hidráulica) requerida. Existen distintas ecuaciones que se utilizan a menudo para evaluar la pérdida de carga por fricción, pero el método fundamentalmente sólido para calcular tales pérdidas de carga es mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (Munson, 2005).

En términos de la ecuación de Bernoulli, lo anterior se puede expresar de la siguiente manera: En la dirección del flujo, debido a la fricción causada por la viscosidad del fluido, se tiene $\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 > \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2$. Entonces, para restaurar la igualdad se debe agregar alguna cantidad escalar al lado derecho de esta desigualdad siendo esta cantidad la pérdida de carga hidráulica, representada por h_f , con lo que la ecuación de Bernoulli considerando pérdidas de carga se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + h_f \quad \dots(8)$$

1.5.3 Ecuación de Darcy-Weisbach

Esta ecuación fue desarrollada por el ingeniero francés Henry Darcy y refinada en 1845 por el matemático e ingeniero Alemán Julius Weisbach, hasta la forma en que se conoce actualmente. Es una ecuación de determinación empírica a la que se puede llegar mediante un análisis dimensional, y como se mencionó antes, relaciona la pérdida de presión o carga hidráulica

provocada por la fricción a lo largo de una tubería cualquiera con la velocidad promedio del flujo del fluido.

La ecuación de Darcy-Weisbach es:

$$h_f = \frac{\Delta P}{\gamma} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \dots(9)$$

donde f es un factor de fricción adimensional, D es el diámetro de la tubería, L es la longitud de la tubería, V es la velocidad promedio de flujo y g es la aceleración de la gravedad.

1.5.4 Factor de fricción de Darcy

El coeficiente de fricción de Darcy constituye un parámetro adimensional fundamental en la ecuación de Darcy-Weisbach, utilizado para calcular las pérdidas de carga debidas a la fricción en tuberías. Hay diversas fórmulas para estimar o calcular este parámetro, y todas ellas están condicionadas al régimen del fluido, siendo que, en ciertos regímenes, también dependen de la rugosidad relativa de la tubería. Es comprobado que la rugosidad relativa no ejerce influencia sobre el coeficiente de fricción en condiciones de flujo laminar ($Re < 2000$), ya que la resistencia proviene principalmente de la fricción entre capas de fluido y no entre estas capas y las paredes de la tubería. Sin embargo, para $Re > 2000$, la rugosidad relativa adquiere una importancia significativa.

En consecuencia, para un flujo laminar completamente desarrollado (número de Reynolds $Re < 2000$), el coeficiente de fricción puede determinarse utilizando la ecuación de Hagen-Poiseuille de la siguiente manera:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \dots(10)$$

Donde, Re es el número de Reynolds, que se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido, o bien, matemáticamente como:

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad \dots(11)$$

Donde ρ es la densidad y μ es la viscosidad dinámica del fluido.

En la zona de transición ($2300 \leq Re \leq 4000$), el flujo experimenta la transición de laminar a turbulento, donde los valores de ciertos parámetros, como el coeficiente de fricción, son imprecisos. Por lo tanto, el enfoque más seguro es considerar que el flujo es turbulento (Williams, 1995). En el cálculo de tuberías en la región turbulenta ($Re \geq 4000$), tanto en tuberías lisas como rugosas, se pueden emplear diversas ecuaciones y correlaciones para determinar el coeficiente de fricción. Sin embargo, la ecuación de Colebrook-White (White 1998) ha demostrado ser la que proporciona una aproximación más cercana al valor real de dicho coeficiente. Cabe destacar que esta ecuación tiene una forma implícita, lo que implica que debe resolverse mediante algún método numérico. La ecuación de Colebrook-White se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[\frac{(\varepsilon/D)}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad \dots(12)$$

Donde ε / D es la rugosidad relativa, siendo esta la relación entre la altura media de rugosidad de la tubería y el diámetro de la tubería.

1.5.5 Pérdidas de carga localizadas

Además de las pérdidas de carga debidas a la fricción a lo largo de una tubería, que se denominan pérdidas de carga continua, existe otro tipo de pérdidas ocasionadas por fenómenos turbulentos generados al pasar líquidos por puntos singulares de las tuberías, como cambios de dirección, codos, juntas, derivaciones y otros accesorios. Estas pérdidas se conocen como

pérdidas de carga localizadas. Es necesario sumar estas pérdidas a las pérdidas de carga continua para obtener las pérdidas totales.

La determinación de las pérdidas de carga localizadas se realiza de la siguiente manera:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad \dots(13)$$

donde K_L es un coeficiente de pérdida local. A pesar de que esta variable carece de dimensiones, su relación en la literatura no se establece con el número de Reynolds y la relación de rugosidad, sino más bien con el tamaño general de la tubería. La mayoría de los datos disponibles están vinculados a condiciones de flujo turbulento, y cada accesorio tiene asignado un valor específico para este coeficiente.

Un método no completamente preciso pero aceptable para estimar las pérdidas de carga localizadas consiste en expresarlas como una longitud equivalente. Esto implica evaluar cuántos metros de tubería recta con el mismo diámetro generarían una pérdida de carga continua equivalente a la que se produce en el punto singular. La longitud equivalente se puede determinar igualando las fórmulas para el cálculo de pérdidas de carga continuas y pérdidas de carga localizadas. En otras palabras:

$$f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = K_L \frac{V^2}{2g} \quad \longrightarrow \quad L = L_e = \frac{K D}{f} \quad \dots(14)$$

De esta manera es posible calcular las pérdidas totales mediante una única fórmula:

$$h_f = f \frac{L_T}{D} \frac{V^2}{2g} \quad \dots(15)$$

Donde $L_T = L + \sum L_{ei}$

1.6 Ganancia de carga (Turbomáquinas)

Las turbomáquinas son dispositivos mecánicos diseñados para extraer energía de un fluido, como en el caso de turbinas, o para agregar energía al fluido, como ocurre con las bombas, gracias a las interacciones dinámicas entre el dispositivo y el fluido. Entre las turbomáquinas más comunes se encuentra la bomba centrífuga. Esta bomba consta de dos componentes principales: un impulsor con álabes o paletas, conectado a un eje giratorio, y una carcasa o voluta estacionaria que envuelve al impulsor. Durante la rotación del impulsor, el fluido es succionado a través del ojo de la carcasa y fluye radialmente hacia el exterior de la bomba, incrementando así la energía del fluido y elevando tanto la presión como la velocidad absoluta. La figura 6 ilustra una vista seccionada de una bomba centrífuga

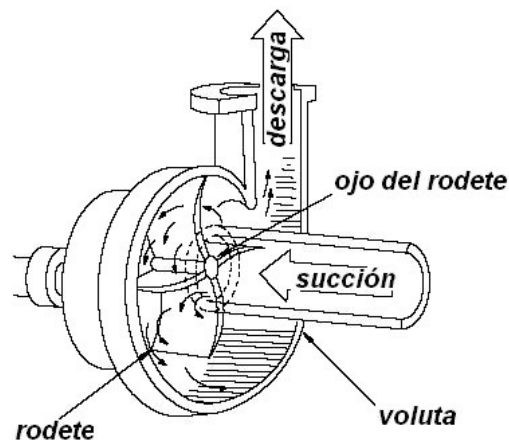


Figura 6. Vista seccionada de una bomba centrífuga.

Al seleccionar una bomba para una aplicación en particular, primero es necesario especificar la capacidad de flujo y la carga requerida de la bomba, por lo que se deberá contar con una o mas bombas con un diseño en específico. No obstante el rendimiento de una bomba centrífuga podrá variar según las condiciones en las que se opere, por ejemplo, por el flujo que se maneje y las pérdidas de carga en la tubería. Además de esto, el rendimiento real de una bomba no se puede

predecir con precisión sobre una base completamente teórica, sino que se determina experimentalmente mediante pruebas en la bomba. A partir de estas pruebas, las características de la bomba se determinan y se presentan como curvas características de la bomba.

Una de las curvas características más importantes de una bomba es la curva motriz, la cual representa la relación de carga – caudal que garantiza la Bomba. Esta curva, al igual que las demás, regularmente son proporcionadas por el proveedor de la bomba, sin embargo, hace ya algunos años, a causa de la extensión del uso de la computación, se comenzó a generalizar el empleo de ecuaciones matemáticas en sustitución de las curvas características para estudiar el comportamiento de los sistemas de bombeo (Riaño y Lorence 2010). Es decir que ahora es posible determinar ecuaciones que describan los gráficos proporcionados por el proveedor y calcular el desempeño de una bomba de manera analítica y precisa.

La ecuación matemática que describe a la curva motriz de una bomba es la siguiente:

$$H = A + BQ + CQ^2 \quad \dots(16)$$

Donde H es la carga proporcionada por la bomba, Q es el caudal y A , B y C son los parámetros que definen la curva motriz de la bomba

1.6.1 Cavitación

Para que un líquido ebulle, generalmente se le suele calentar, no obstante, además de esto, también es posible reducir la presión en su entorno hasta que el líquido ebulle sin necesidad de aumentar su temperatura. Esto se puede intuir a razón de que el punto de ebullición de un líquido, se define como la temperatura a la cual la presión de vapor saturado de dicho líquido, es igual a la presión atmosférica de su entorno.

Como se ha visto anteriormente, la ecuación de Bernoulli menciona que conforme aumenta la velocidad de un fluido, su presión disminuye. Teniendo esto en cuenta, se puede prever que no es posible aumentar el flujo de un líquido en una tubería sin restricciones, ya que el flujo de cualquier fluido es función de su velocidad, y si esta aumenta desmesuradamente, el líquido se podría evaporar y causar eventos inesperados y/o perjudiciales en un proceso. Uno de estos eventos perjudiciales es la cavitación.

La cavitación se refiere a la rápida evaporación y condensación del fluido en el lado de baja presión del impulsor de la bomba, lo que provoca la formación y explosión repentina de burbujas de vapor. Estas explosiones aún a escala microscópica, pueden deteriorar el material del impulsor, provocar una disminución en la eficiencia de la bomba, e incluso estropearla. Aunque hoy en día existen bombas que soportan el efecto de la cavitación, estas tienen un costo mayor a las convencionales, por lo que lo mejor es evitar que este fenómeno ocurra.

Para evitar que se produzca cavitación en una bomba, se requiere evitar la evaporación del líquido a la entrada de la misma, es decir evitar que la presión en dicho punto sea menor a la presión de vapor del líquido; En el presente trabajo se pretende desarrollar un programa que alerte en caso de que este fenómeno ocurra, por lo que se deberá calcular la presión de vapor del líquido en la red de tuberías, y compararla con la presión en la misma. Para calcular la presión de vapor de un líquido, se emplea la ecuación de Antoine:

$$P_v = e^{A - \frac{B}{C+T}}$$

Donde

P_v es la presión de vapor del líquido

T es la temperatura del líquido

A , B y C son constantes propias de cada líquido.

1.7 Qué es un fluido

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente cuando actúa sobre un esfuerzo cortante de cualquier magnitud (Munson, 2005). Se crea una fuerza de esfuerzo cortante por área unitaria cada vez que una fuerza tangencial actúa sobre una superficie tal como se muestra en la figura 7. La fuerza de corte y la tasa de flujo dependen de qué tanto se oponga el fluido a la fuerza aplicada, la magnitud de esta resistencia esta dada por una propiedad llamada viscosidad.

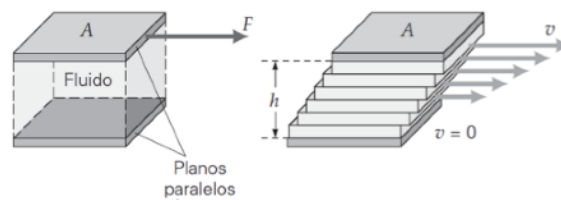


Figura 7. Deformación de un fluido debido a un esfuerzo cortante.

1.8 Viscosidad de gases

La viscosidad se define como la medida de la resistencia de un fluido que se está deformando por un esfuerzo cortante o un esfuerzo de tracción, o en otras palabras, la viscosidad es una medida de la fricción interna del fluido, que tiende a oponerse a cualquier cambio dinámico en el movimiento del fluido. Todos los fluidos reales (excepto los superfluidos) tienen cierta resistencia al estrés y, por lo tanto, son viscosos. En el caso de los líquidos, la viscosidad se debe a fuerzas de cohesión moleculares y en los gases, se debe a los choques entre las moléculas (transferencia de momentum).

Derivado de lo anterior, y cómo se podrá haber deducido de ecuaciones anteriores, el incremento de la viscosidad de un fluido generará mayor fricción y en consecuencia, mayores pérdidas de carga. Por esto es necesario conocer su magnitud; La teoría de la viscosidad de los líquidos no está tan desarrollada, sin embargo hay un amplio reporte de sus magnitudes en la literatura. Por

otra parte, los mecanismos y la teoría molecular de la viscosidad de los gases han sido razonablemente bien aclarados por la mecánica estadística y la teoría cinética de los gases (Millat, et al., 1996), por lo que existen distintos métodos para estimar sus valores.

Actualmente los métodos mas usados para estimar la viscosidad de un gas a bajas presiones son el método de Lucas, el método de Chung, et al y el método de Reichenberg. Es importante considerar que al emplear cualquiera de estos métodos se obtendrán resultados con un 0.5 a 1.5% de error para compuestos no polares y un 2 a 4% de error para compuestos polares, no obstante, todos ellos son útiles para desarrollar cálculos ingenieriles efectivos. En la tabla 1 se presentan algunas particularidades de cada método con el fin de seleccionar uno de ellos para el trabajo presente.

Método	Datos de entrada	Desventajas
Método de Lucas (1980 - 1984)	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos no polares: T_c, P_c, M • Compuestos polares: T_c, P_c, M, μ, Z_c 	<ul style="list-style-type: none"> • No es adecuado para gases altamente asociados como el ácido acético.
Método de Chung, et al (1984 -1988)	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos no polares: T_c, V_c, M • Compuestos polares: T_c, V_c, M, μ, κ 	<ul style="list-style-type: none"> • El volumen crítico está menos disponible que la presión crítica en la literatura. • El factor κ es una constante empírica que se tiene que determinar mediante datos experimentales de viscosidad. • No es adecuado para H₂, He, Ne.

<p style="text-align: center;">Método de Reichenberg (1979)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos no polares: Grupo estructural, T_c, M • Compuestos polares: Grupo estructural, T_c, M, μ 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere describir los grupos estructurales del gas a manejar. • No es adecuado para gases inorgánicos. • No se puede aplicar para gases orgánicos de los que no se ha determinado su grupo estructural.
--	---	---

Tabla 1. Métodos para estimar la viscosidad de gases a bajas presiones

1.8.1 Método de Lucas.

Este método también tiene la ventaja de que se recomienda como método de uso general en programas de computadora, y de la tabla 1 se puede observar que tiene menos desventajas con respecto a los otros (Pollina et al, 2010), además de que los datos de entrada se pueden encontrar fácilmente y es aplicable para la mayoría de los compuestos. Este método fue desarrollado por K. Lucas entre los años 1980 y 1984 (Muñoz 2016) y se describe a continuación.

$$\eta\xi = [0.807T_r^{0.618} - 0.357\exp(-0.449T_r) + 0.340\exp(-4.058T_r) + 0.018]F_p^\circ F_Q^\circ$$

Donde: η [=] μP ...(18)

$$\xi = 0.176 \left(\frac{T_c}{M^3 P_c^4} \right)^{1/6} \quad \dots(19)$$

Donde: T_c [=] K , M [=] g/mol y P_c [=] bar

$$\mu_r = 52.46 \left(\frac{\mu^2 P_c}{T_c^2} \right) \quad \dots(20)$$

$$F_p^\circ = 1 \quad 0 \leq \mu_r < 0.022 \quad \dots(21)$$

$$F_p^\circ = 1 + 30.55(0.292 - Z_c)^{1.72} \quad 0.022 \leq \mu_r < 0.075 \quad \dots(22)$$

$$F_p^\circ = 1 + 30.55(0.292 - Z_c)^{1.72}[0.96 + 0.1(T_r - 0.7)] \quad 0.075 \leq \mu_r \quad \dots(23)$$

El factor F_Q° tendrá un valor de 1 para todos los gases, excepto para H₂, He y Ne. Para estos gases el factor F_Q° toma el valor de la siguiente ecuación:

$$F_Q^\circ = 1.22Q^{0.15}[1 + 0.00385[(T_r - 1)^2]^{1/M} \text{sign}(T_r - 12)] \quad \dots(24)$$

Donde:

$$Q = 1.38(\text{He}), Q = 0.76(\text{H}_2), Q = 0.52(\text{Ne}) \quad \dots(25)$$

Sing() indica que se debe usar +1 o -1 dependiendo de si el valor entre paréntesis es mayor o menor que cero respectivamente.

1.9 Distribución de refrigerantes

1.9.1 Transferencia de calor

Una función primordial de las redes de distribución en la industria es llevar un fluido específico a las áreas, ya sea a máquinas o dispositivos, donde se requiere la transferencia de calor. En términos sencillos, la transferencia de calor, también conocida como calor, se refiere a la energía en movimiento debido a una diferencia de temperatura (Incropera, 2006). Este proceso puede tener lugar mediante tres mecanismos distintos y en cuerpos en diversos estados, de manera natural o forzada mediante equipos especializados, conocidos como intercambiadores de calor. Estos dispositivos, como su nombre indica, facilitan la transferencia de energía de un fluido a otro cuerpo sin contacto directo, utilizando una pared sólida como medio separador.

Es importante destacar que las redes de distribución no cumplen la función directa de equipos de transferencia de calor; en su lugar, su propósito es simplemente transportar la cantidad necesaria

de fluido a estos equipos. De hecho, al utilizar las redes de distribución de esta manera, se busca que estén térmicamente aisladas para evitar que el fluido transportado intercambie calor con el entorno antes de llegar al área de destino. Por esta razón, los cálculos asociados con este fenómeno no son necesarios al diseñar las redes de distribución. Sin embargo, dado que esta aplicación de las redes de distribución es común y vital en la industria, en este trabajo se desarrolló una base de datos que facilita la obtención de propiedades de los fluidos más comunes utilizados en la transferencia de calor.

1.9.2 Refrigerantes

La transferencia de calor entre dos cuerpos siempre ocurre desde el cuerpo con una temperatura más elevada hacia el cuerpo con una temperatura más baja. A pesar de que técnicamente solo existe un tipo de transferencia de calor, se distingue entre los cuerpos involucrados en este proceso. Se dice que el cuerpo que cede energía es el que se enfría, mientras que el cuerpo que recibe esta energía se calienta. Para calentar un cuerpo (excluyendo los combustibles), se utiliza comúnmente el vapor de agua debido a su fácil obtención, bajo costo y alto calor latente. En contraste, para enfriar un cuerpo, existen diversos fluidos a considerar, conocidos como refrigerantes.

La elección de un refrigerante dependerá de varios factores, principalmente de sus propiedades termodinámicas, físicas y químicas (Stoecker, 1998). Estas propiedades influyen en el diseño de los equipos que los contienen, lo que a su vez afecta su costo, así como factores ambientales y de seguridad del personal, entre otros aspectos. A pesar de las consideraciones necesarias al seleccionar un refrigerante, en la actualidad existen métodos sencillos para este propósito, y se pueden encontrar tablas que contienen información sobre los refrigerantes más utilizados junto con sus propiedades. La Tabla 2 presenta algunos de los refrigerantes más comúnmente empleados a nivel mundial (Urrego, 2018), y algunos de ellos se han incorporado a la base de datos de este documento.

Identificación	Nombre químico	Fórmula química
R22	Clorodifluorometano	CHClF ₂
R134a	1,1,1,2-Tetrafluoroetano	CH ₂ FCF ₃
R170	Etano	CH ₃ CH ₃
R290	Propano	CH ₃ CH ₂ CH ₃
R600	Butano	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃
R600a	2-Metilpropano (Isobutano)	CH(CH ₃) ₃
R1270	Propileno	CH ₂ CHCH ₃
R717	Amoniaco	NH ₃
R744	Dióxido de carbono	CO ₂
R404A	Mezcla HFC (R125 - R143a - R134a) (44% - 52% - 4%)	-
R407C	Mezcla HFC - HFD (R134a - R125 - R132) (52% - 25% - 23%)	-
R410A	Mezcla HFC - HFD (R125 - R132) (50% - 50%)	-
MO29 (R402D)	Mezcla HFC - HC (R34a - R125 - R600a) (31.5% - 65.1% - 3.4%)	-
MO49 (R413A)	Mezcla HFC (R134a - PFC218 - R600a) (88% - 9% - 3%)	-
MO59 (R417A)	Mezcla HFC-HC (R125 - R134a - R600) (46.6% - 50% - 3.4 %)	-

MO79 (R422A)	Mezcla HFC-HC (R125 - R134a - R600a) (85.1% - 11.5% - 3.4 %)	-
HFO 1234yf	2,3,3,3-Tetrafluoropropeno	CF ₃ CFCH ₂
R507	Mezcla HFC (R125 - R143a) (50% - 50%)	-

Tabla 2. Refrigerantes más usados a nivel mundial

1.10 Método seleccionado (Método del Gradiente hidráulico)

El método del Gradiente, desarrollado por E. Todini y S. Pilati en 1987, presenta una formulación en la cual las ecuaciones individuales de energía en cada tubería se integran con las ecuaciones individuales de conservación en cada nodo. Esto permite obtener una solución simultánea tanto para las cargas en los nodos como para los caudales individuales en las tuberías. De manera similar a los métodos "Circuito Simultáneo" y "Teoría Lineal", las ecuaciones no lineales de energía se linealizan mediante la expansión en series de Taylor. No obstante, en contraste con métodos anteriores, este enfoque resuelve las ecuaciones mediante un esquema eficiente que utiliza la inversión de la matriz de coeficientes originales. En la actualidad, la mayoría de los programas de software comerciales disponibles en el mercado han incorporado de este método para sus métodos de solución.

Algunos aspectos más importantes a destacar del método del gradiente hidráulico son los siguientes:

- El trabajo con matrices de manera dispersa permite la reducción de la memoria requerida y el tiempo de cálculo en computadores en hasta un 50% del tiempo para redes grandes (Saldarriaga, 2016)

- El método del gradiente realiza el cálculo y ajuste simultáneo de los caudales y las cabezas, destacándose como el método más eficiente en comparación con la teoría lineal. Esta eficiencia se traduce en una reducción significativa del número de iteraciones necesarias.
- El método del gradiente no requiere la definición de caminos de energía o circuitos, lo que implica una disminución en la cantidad de datos que el usuario debe proporcionar al sistema informático, simplificando así la gestión de la información.
- No se requiere de estimaciones iniciales, lo que evita la necesidad de hacer un análisis previo al análisis de la red en sí misma al igual que la necesidad de contar con un experto en redes para suministrar los datos.

1.10.1 Descripción matemática

La metodología del gradiente utilizada en el cálculo de redes de distribución de fluidos se fundamenta en la premisa fundamental de que al mantener un flujo constante, se asegura el cumplimiento de las ecuaciones de conservación de masa en todos los nodos de la red, así como la ecuación de conservación de energía en cada uno de sus circuitos. Por lo tanto, el método se apoya en las siguientes dos condiciones:

En todos los nodos se debe cumplir la ecuación de continuidad:

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{Di} + Q_{ei} = 0 \quad \dots(26)$$

- Debe existir una relación no lineal entre las pérdidas por fricción y el caudal para cada uno de los tubos que componen la red. Esta relación se da al combinar las ecuaciones de Colebrook-White y Darcy:

$$Q = -2 \frac{\sqrt{2gDh_f}}{L} \text{Alog}_{10} \left(\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51\nu\sqrt{L}}{\sqrt{2gD^3h_f}} \right) \dots(27)$$

Si se tienen en cuenta las pérdidas menores, la posible existencia de bombas en algunos de los tubos de red, y la diferencia en la altura de los extremos de cada tubería, la anterior ecuación toma la siguiente forma general, válida para todas las tuberías:

$$h_f = \alpha Q^n + \beta Q - \gamma - Z \quad \dots(28)$$

Donde:

n = exponente que depende de la ecuación de fricción utilizada (igual 2.0 para en caso de usar la ecuación de Darcy-Weisbach)

$\alpha = 0.0826fL/D^5$ Representa las pérdidas de carga por longitud de tramo recto

$\beta = 8Qk/g\pi^2D^4$ Representa las pérdidas de carga localizadas

$\gamma = A + BQ + CQ^2$ Es la ecuación característica de una bomba

Z = Diferencia en la altura en los extremos de cada tubería

Para el método del gradiente hidráulico se hacen las siguientes definiciones adicionales:

NT = Número de tuberías en la red

NN = Número de nodos con carga desconocida

$[A12]$ = "matriz de conectividad" relacionada con cada uno de los nodos de la red. Su dimensión es $NT \times NN$ con todos sus elementos igual a 0 excepto 2 en la i -ésima fila:

-1 en la columna correspondiente al nodo inicial del tramo i

1 en la columna correspondiente al nodo final del tramo i

NS= número de nodos de carga fija o conocida

[A10] = matriz topológica tramo a nodo para los NS nodos de carga fija. Su dimensión es NT X NS con un valor igual a -1 en las filas que corresponden a los tramos conectados a los nodos de carga conocida o fija.

Teniendo en cuenta las anteriores definiciones, la pérdida de carga en cada tramo de tubería que conecte dos nodos de la red es:

$$[A11][Q] + [A12][H] = - [A10][H_o] \quad \dots(29)$$

donde:

[A11] = matriz diagonal de NT X NT definida como sigue:

$$[A11] = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{n_1-1} + \beta_1 - \frac{\gamma_1}{Q_1} - \frac{Z_1}{Q_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{n_2-1} + \beta_2 - \frac{\gamma_2}{Q_2} - \frac{Z_2}{Q_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{NT} Q_{NT}^{n_{NT}-1} + \beta_{NT} - \frac{\gamma_{NT}}{Q_{NT}} - \frac{Z_{NT}}{Q_{NT}} \end{bmatrix}$$

...(30)

[Q] = vector de caudales con dimensión NT X 1

[H] = vector de cargas desconocidas con dimensión NN X 1

[H_o] = vector de cargas fijas con dimensión NS X 1

Es evidente que la ecuación (29) es una ecuación de conservación de energía. La ecuación de continuidad para todos los nodos de la red es:

$$[A21][Q] = [q] \quad \dots(31)$$

Donde:

$[A21]$ = matriz transpuesta de $[A12]$

$[q]$ = vector de consumo (demanda) o de entrada (suministro) en cada nodo de la red, con dimensión $NN \times 1$

En forma compacta, las ecuaciones (29) y (31) se pueden expresar de forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} [A11] & [A12] \\ [A21] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [Q] \\ [H] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[A10][H_o] \\ [q] \end{bmatrix} \quad \dots(32)$$

Dado que la parte superior es no lineal, la ecuación anterior no puede ser resuelta de forma directa. Es necesario utilizar algún algoritmo iterativo. El método del gradiente se lleva a cabo al realizar una expansión truncada de Taylor. Al operar simultáneamente sobre el campo ($[Q]$, $[H]$) y aplicar el operador gradiente se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [N][A11]' & [A12] \\ [A21] & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [dQ] \\ [dH] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [dE] \\ [dq] \end{bmatrix} \quad \dots(33)$$

Donde:

$[N]$ = Matriz diagonal $(n_1, n_2, \dots, n_{NT})$ con dimensión $NT \times NT$

$[A11]'$ = matriz con dimensión $NT \times NT$ definida como:

$$[A11]' = \begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{n_1-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{n_2-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{NT} Q_{NT}^{n_{NT}-1} \end{bmatrix} \quad \dots(34)$$

En cualquier iteración i , $[dE]$ representa el desbalance de energía por unidad de carga en cada tubo y $[dq]$ representa el desbalance de caudal en cada nodo. Estos desbalances están dados, respectivamente, por las siguientes ecuaciones:

$$[dE] = [A11][Q_i] + [A12][H_i] + [A10][H_o] \quad \dots(35)$$

$$[dq] = [A21][Q_i] - [q] \quad \dots(36)$$

El objetivo del método del gradiente es solucionar el sistema descrito mediante la ecuación (33), teniendo en cuenta que para cada iteración es evidente que:

$$[dQ] = [Q_{i+1}] - [Q_i] \quad \dots(37)$$

$$[dH] = [H_{i+1}] - [H_i] \quad \dots(38)$$

Recurriendo al álgebra matricial es posible calcular en forma explícita la matriz inversa del sistema representado por la ecuación (33). Si se procede de esta manera y se introducen las ecuaciones (35), (36), (37) y (38) es posible demostrar que la solución de la ecuación (38) está dada por las siguientes dos ecuaciones:

$$[H_{i+1}] = - ([A21]([N][A11]')^{-1}[A12])^{-1}([A21]([N][A11]')^{-1}[A11][Q_i] + [A10][H_o] - [A21][Q_i] - [q])$$

$$[Q_{i+1}] = ([I] - [N^{-1}][A11]' - [A11])[Q_i] - (([N][A11]')^{-1}([A12][H_{i+1}] + [A10][H_o]))$$

Es posible reescribir la ecuación (39) como un sistema de ecuaciones lineales para las cargas desconocidas $[H_{i+1}]$, en la siguiente forma:

$$[A21]([N][A11]')^{-1}[A12])[H_{i+1}] = - ([A21]([N][A11]')^{-1}([A11][Q] + [A10][H_o]) - ([A21][Q_i] - [q]) \dots(41)$$

1.11 MATLAB

De acuerdo a la corporación creadora de MATLAB, MathWorks, “MATLAB es una plataforma de programación diseñada específicamente para que ingenieros y científicos analicen y diseñen sistemas y productos que transforman nuestro mundo. El corazón de MATLAB es el lenguaje MATLAB, un lenguaje basado en matrices que permite la expresión más natural de las matemáticas computacionales.”

MATLAB, además de tener un lenguaje sencillo e intuitivo, está basado en matrices, lo que facilita la inserción del método matemático descrito anteriormente, ya que este emplea matrices en todo momento, pues como se mencionó, es lo más natural para un desarrollo computacional. Cabe mencionar que este programa cuenta con un amplio soporte de funciones ya desarrolladas (No hace falta programarlas como en otros lenguajes), y cuenta con una comunidad muy extendida, existiendo foros en la web donde se comparten experiencias, soporte e ilustración a los usuarios. Por todo lo anterior, esta plataforma resulta una excelente opción para desarrollar el método propuesto.

1.12 Microsoft Excel

Aunque el lenguaje de MATLAB resulta sencillo e intuitivo, es necesaria una instrucción previa para poder entender y manipular la plataforma, e incluso para ejecutar un programa e interpretar los resultados arrojados. Debido a esto, existe el riesgo de modificar accidentalmente el programa y estropearlo, obtener resultados erróneos por una incorrecta ejecución, o dar una mala interpretación de los resultados obtenidos. Por esto, se ha propuesto implementar una interfaz accesible y comprensible para la mayoría de los usuarios. Esta interfaz será desarrollada en la plataforma de Microsoft Excel.

Microsoft Excel es una hoja de cálculo que contiene una serie de filas y columnas, donde a cada intersección de una fila con una columna se le conoce como una “celda”. Cada celda puede ser nombrada independientemente y puede contener un dato o valor, ya sean números, textos, fórmulas, fechas u horas. Gracias a esta organización, resulta fácil introducir y localizar información, ya que se puede ordenar y diseñar esta hoja de cálculo de la manera que uno desee.

Además de lo anterior, Microsoft Excel es un programa que está en la mayoría de los ordenadores actuales y suele ser dominado por la mayoría de las personas que usan estas máquinas. Por esto, lo más probable es que no se requiera de una instrucción previa para usar la

interfaz desarrollada y tampoco que se requiera la adquisición de ninguna licencia extra para la ejecución del programa.

Desarrollo

2.1 Descripción del proceso iterativo

Las ecuaciones (40) y (41) representan un sistema acoplado que debe ser resuelto en forma iterativa. El paso más complicado en cada iteración es la solución del sistema representado mediante la ecuación (41), ya que se trata de un sistema de ecuaciones disperso, simétrico, lineal y definido positivamente con NN incógnitas: las cargas desconocidas $[H_{i+1}]$ en los nodos de la red. Una vez se conoce este vector es posible calcular $[Q_{i+1}]$ en forma explícita, mediante la ecuación (40). El proceso de solución se puede resumir en los siguientes pasos:

Se suponen caudales iniciales en cada uno de los tubos de la red (no necesariamente balanceados, lo cual implica ahorro de tiempo).

Se resuelve el sistema representado por la ecuación (41) utilizando un método estándar para la solución de ecuaciones lineales simultáneas.

Con $[H_{i+1}]$ calculado se utiliza la ecuación (41) para determinar $[Q_{i+1}]$

Con este $[Q_{i+1}]$ se vuelve a ensamblar el sistema (41) para encontrar un nuevo $[H_{i+1}]$

El proceso se repite hasta que en dos iteraciones sucesivas $[H_{i+1}] \approx [H_i]$

A partir de la segunda iteración, los sistemas representados por las ecuaciones (40) y (41) se simplifican, ya que se tendría lo siguiente:

$$[A_{21}][Q_i] - [q] = 0$$

2.2 Interfaz de usuario

Con la finalidad de que la interfaz de usuario desarrollada tuviera sencillez y claridad, esta se dividió en seis secciones, por lo que la información a ingresar quedarán separados en datos de las tuberías, datos de la red, datos de las cargas conocidas, datos de las cargas desconocidas, y datos de las bombas en la red. La primera sección, se divide a su vez en 10 columnas, en las cuales se tendrán que ingresar los siguientes datos en el mismo orden:

- 1.- Número de tuberías que conforman la red
- 2.- Número asignado a la tubería n. Este valor es arbitrario, no deberá repetirse para las distintas tuberías. Estos datos irán desde 1 hasta el número de tuberías en la red, o bien un número de identificación.
- 3.- Número asignado al nodo inicial (donde entra el flujo) de la tubería n. Este valor es arbitrario, no deberá repetirse para los distintos nodos.
- 4.- Número asignado al nodo final (donde sale el flujo) de la tubería n. Este valor es arbitrario, no deberá repetirse para los distintos nodos.
- 5.- Diferencia de altura con respecto al nivel de piso entre el nodo inicial y el nodo final de la tubería n.
- 6.- Longitud de la tubería n.
- 7.- Diámetro nominal de la tubería n. Estos datos se podrán seleccionar de una pestaña desplegable.
- 8.- Diámetro de la tubería n. Estos datos se rellenarán automáticamente al seleccionar un diámetro nominal en cada fila.
- 9.- Suma de los coeficientes de pérdida localizada en la tubería n.
- 10.- Flujo calculado en la tubería n. Estos datos se rellenarán automáticamente al ejecutar el código desarrollado.

Datos de las tuberías									
Número de tuberías	Número de tubería	Nodo inicial	Nodo final	Diferencia de altura [m]	Longitud de la tubería [m]	NPS	Diámetro de la tubería [m]	Σk_i	Flujo calculado en la tubería [L/s]

Figura 8. Primera sección de la interfaz de usuario (Datos de las tuberías que conforman la red).

La segunda sección de la interfaz, que albergará los datos referentes la red de distribución (no a cada tubería), se dividió en 5 columnas, en las que se tendrán que ingresar los siguientes datos en el mismo orden:

- 1.- Estado del fluido que distribuirá la red: líquido o gaseoso.
- 2.- Temperatura del fluido que distribuirá la red.
- 3.- Viscosidad del fluido que distribuirá la red.
- 4.- Material del que están construidas las tuberías de la red. Este dato se podrá seleccionar de una pestaña desplegable.
- 5.- Rugosidad relativa de la tubería. Este dato se rellenará automáticamente al seleccionar un material de tubería.

Datos de la red				
Fluido	Temperatura [K]	Viscosidad cinemática [m ² /s]	Material tuberías	Rugosidad relativa [m]

Figura 9. Segunda sección de la interfaz de usuario (Datos de la red de tuberías).

La tercera sección de la interfaz se dividió en cuatro columnas que tendrán los datos de la(s) carga(s) conocidas en la red y que se ordenaron de la siguiente manera:

- 1.- Número de nodos en la red.
- 2.- Número de nodos con carga conocida.
- 3.- Número asignado al nodo n con carga conocida. Es el mismo número que se le asignó para los datos de la primera sección.
- 4.- Carga en el nodo n.

Datos cargas conocidas			
Numero de nodos	Número de nodos con carga conocida	Número de nodo con carga conocida	Carga en el nodo [m]

Figura 10. Tercera sección de la interfaz de usuario (Datos de las cargas conocidas en la red de tuberías).

La cuarta sección de la interfaz se dividió en tres columnas que tendrán los datos de las cargas desconocidas en la red y que se ordenaron de la siguiente manera:

- 1.- Número asignado al nodo n con carga desconocida. Es el mismo número que se le asignó para los datos de la primera sección.
- 2.- Demanda en el nodo n.
- 3.- Carga calculada en el nodo n. Estos datos se rellenarán automáticamente al ejecutar el código desarrollado.

Datos cargas desconocidas		
Número de nodo con carga desconocida	Demanda en el nodo [L/s]	Carga calculada en el nodo [m]

Figura 11. Cuarta sección de la interfaz de usuario (Datos de las cargas desconocidas en la red de tuberías).

Por último, la quinta sección de la interfaz, que albergará los datos de las bombas hidráulicas existentes en la red de distribución, se dividió en 5 columnas, en las cuales se ingresarán los datos en el siguiente orden:

- 1.- Número de tuberías con bombas hidráulicas instaladas.
- 2.- Numero asignado a la tubería n con bomba hidráulica. Es el mismo número que se le asignó para los datos de la primera sección.
- 3.- Constante A de la ecuación de la curva motriz de la bomba en la tubería n.
- 4.- Constante B de la ecuación de la curva motriz de la bomba en la tubería n.
- 5.- Constante D de la ecuación de la curva motriz de la bomba en la tubería n.

Datos bombas				
Número de tuberías con bombas	Número de tubería con bomba	Constante A	Constante B	Constante C

Figura 12. Quinta sección de la interfaz de usuario (Datos de las bombas presentes en la red de tuberías).

2.3 Desarrollo del código

A continuación se muestra el desarrollo del método en MATLAB; Para desarrollar el método iterativo descrito anteriormente, es necesario crear las matrices que se encuentran en las ecuaciones 22, 23 y 24, estas son:

$[Q_o]$, $[H_o]$, $[q]$, $[A12]$, $[A21]$, $[A10]$, $[N]$, $[I]$, $[A11]$, $[A11]'$, $[H_{i+1}]$ y $[Q_{i+1}]$

Se procederá a desarrollar estas, sin embargo, dado que los vectores $[H_{i+1}]$ y $[Q_{i+1}]$ y las matrices $[A11]$ y $[A11]'$ son función del vector $[Q_i]$, y este es variable, estos serán desarrollados dentro de un ciclo iterativo. No obstante, se puede observar que estos vectores y matrices son función de $[A11]$, que $[A11] = f(Q, \alpha, \beta, \gamma, Z)$, y que a su vez $\alpha = f(D, Q, L, e, \mu)$, $\beta = f(D, Q, k)$ y $\gamma = f(D, A, B, C)$, por lo que todos los argumentos (excepto Q) de estas matrices son constantes, así que lo más conveniente es obtener sus valores antes de comenzar el ciclo iterativo.

Antes de crear los vectores y matrices, se extrajeron por partes los datos mencionados (D, L, Z, k, e, μ , A, B y C) de la interfaz en Excel añadiéndolos a una matriz con el comando **readmatrix(Dirección del archivo, valores)**. Para ello, se determinó primero el rango de las celdas que contienen la primera parte de los datos en la interfaz (la primera sección de la interfaz), este va desde la primera fila de la primera columna que contiene los datos (Valor fijo = B5), hasta la celda de la última fila (Igual al número de tubos en la red + 4) de la última columna (Valor fijo = H) que contienen los datos; Los datos extraídos de este rango fueron: Diámetros y longitudes de los tubos, nodo inicial y final de cada tubo y su diferencia de altura, y los coeficientes de pérdidas localizadas en cada tubo.

Número de tubos en la red:

```
NT=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range','B5:B5');
```

Valor de la última fila con datos en la interfaz:

```
Rng=num2str(NT+4);
```

Rango de la matriz:

```
Rng=strcat('B5:J',Rng);
```

Matriz con los datos de los tubos en la red:

```
M=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range',Rng);
```

Diametros:

```
D=M(:,8);
```

Longitudes:

```
L=M(:,6);
```

Nodos iniciales (Ji) y finales (Jf) en cada tubo:

```
Ji=M(:,3)';
```

```
Jf=M(:,4)';
```

Diferencias de altura entre los nodos inicial y final de cada tubo (No se considera si el flujo es gaseoso):

```
EF=readcell('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range','M5:M5');  
if strcmp('Líquido',EF)==1  
    Z=M(:,5);  
else  
    Z=0;  
end
```

Coefficientes de perdidas localizadas en cada tubo:

```
K=M(:,9);
```

Posteriormente se extrajeron los datos de la viscosidad del fluido y la rugosidad relativa de los tubos, los cuales se encuentran en celdas fijas de la interfaz (J3 y K3 respectivamente).

Viscosidad

```
n=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range','P5:P5');
```

Rugosidad relativa

```
e=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range','R5:R5');
```

Seguido de esto, se extrajeron los valores de las constantes A, B y C de las bombas en los tubos y se creo una matriz que los contiene. Para esto se comprueba que existan bombas en las tuberías extrayendo el valor NB (Número de tubos con bombas) de la interfaz. Si $NB > 0$, se extraen primero el número de los tubos que cuentan con bombas centrifugas, estos datos se encuentran en la columna AD, desde la fila 5, hasta la fila NB+4; de manera similar se extraen los valores de las constantes A, B y C para cada bomba de cada tubo, estos valores se encuentran en las columnas AE, AF y AG respectivamente, desde la fila 5 hasta la fila NB+4.

```
%Número de tubos con bombas:  
NB=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range','AC5:AC5');  
  
%Números de los tubos con bombas:  
if NB>0  
Rng=strcat('AD5:AD',num2str(NB+4));  
TB=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range',Rng);  
  
%Constantes A:  
Rng=strcat('AE5:AE',num2str(NB+4));  
A=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range',Rng);  
  
%Constantes B:  
Rng=strcat('AF5:AF',num2str(NB+4));  
B=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range',Rng);  
  
%Constantes C:  
Rng=strcat('AG5:AG',num2str(NB+4));  
C=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range',Rng);  
  
%Matriz con las constantes A, B y C de cada bomba
```

```

Bomb=zeros (NT, 3);
i=0;
for k=1:NB
    i=i+1;
    Bomb(TB(i), 1)=A(i);
    Bomb(TB(i), 2)=B(i);
    Bomb(TB(i), 3)=C(i);
end
else
    Bomb=zeros (NT, 3);
end

```

Ahora ya se cuenta con los datos que se requerían para las matrices dentro del ciclo iterativo, a continuación y de manera similar se crearán las matrices requeridas en el orden establecido.

Creación del vector Q:

```
Q=ones (NT, 1)*0.2
```

Numero de nodos

```
NN=readmatrix('Redes.xlsx', 'sheet', 'Datos', 'Range', 'M3:M3');
```

Número de nodos con carga fija o conocida:

```
NS=readmatrix('Redes.xlsx', 'sheet', 'Datos', 'Range', 'N3:N3');
```

Número del / los nodo(s) que tiene(n) la(s) carga(s) fija(s) o conocida(s)

```

NSs=num2str(NS);
Rng=strcat('O3:O', 2+NSs);
S=readmatrix('Redes.xlsx', 'sheet', 'Datos', 'Range', Rng);

```

Creación del vector [Ho] :

```

Rng=strcat('P3:P', 2+NSs);
Ho=readmatrix('Redes.xlsx', 'sheet', 'Datos', 'Range', Rng);

```

Creación del vector [q] :

```
Rng=strcat('S3:S',2+num2str(NN-NS));  
qo=readmatrix('Redes.xlsx','sheet','Datos','Range',Rng)./1000;
```

Creación de la matriz [A12]:

```
A12=zeros(NT,NN);  
% -1 en la columna correspondiente al nodo inicial del tramo i  
i=0;  
for k= 1:NT  
    i=i+1;  
    A12(i, Ji(i))=-1;  
end  
% 1 en la columna correspondiente al nodo final del tramo i  
i=0;  
for k= 1:NT  
    i=i+1;  
    A12(i, Jf(i))=1;  
end  
% Se eliminan las columnas correspondientes a los nodos con carga  
conocida  
i=0;  
for k=1:NS  
    i=i+1;  
    A12(:, S(i))=[];  
end
```

Creación de la matriz [A21] :

```
A21=A12' ;
```

Creación del vector [A10]:

```
A10=zeros(NT, NS) ;
```

Creación de la matriz [N]:

```
v=ones(1, NT)*2;  
N=diag(v);
```


Creación de la matriz [I]:

```
I=rref(N);
```

Ciclo iterativo (Solución de las ecuaciones 22 - 24):

```
Error=1;
iter=0;
while Error>=0.0001
    iter=iter+1;

    % Creación del vector alpha:
    f=ff(e,Q',D',n);
    f=f';
    a=0.08262686.*f.*L./D.^5;

    % Creación del vector betha:
    B=K.*Q.*8./(9.81*pi^2.*D.^4);

    % Creación del vector gamma:
    g=Bomb(:,1).*Q.^2+Bomb(:,2).*Q+Bomb(:,3);

    % Creación de la matriz [A11]:
    v=ones(1,NT).*(a.*Q+B-g./Q-Z./Q)';
    A11=diag(v);

    %[A11]':
    v=ones(1,NT).*(a.*Q)';
    A11p=diag(v);

    %Hi+1:
```

```

Hs=- (A21*(N*A11p)^(-1)*A12)^(-1)*(A21*(N*A11p)^(-1)*(A11*Q+A10*Ho)-
(A21*Q-qo));
Hs2=-((A21*N^-1*A11^-1*A12)^(-1))*(A21*N^-1*(Q+A11^-1*A10*Ho)+qo-
A21*Q);

%Qi+1:
Qs=((I-(N*A11p)^(-1)*A11)*Q-(N*A11p)^(-1)*(A12*Hs+A10*Ho));
Qs2=(I-N^-1)*Q-N^-1*A11^-1*(A12*Hs2+A10*Ho);

Error=norm(abs(Qs-Q));
Q=Qs;

if iter>=20
break
end
end

%Exportación de los resultados a la interfaz
Rng=strcat('K5:K',num2str(length(Q)+4));
writematrix(Q,'Redes.xlsx','sheet','Datos','Range',Rng)

Rng=strcat('AA5:AA',num2str(length(Hs)+4));
writematrix(Hs,'Redes.xlsx','sheet','Datos','Range',Rng)

```

Para los valores del factor de fricción utilizado en el vector alpha dentro del ciclo iterativo, lo más conveniente fue calcularlo mediante una función fuera del código. Esta función resuelve la ecuación de Colebrook-White para todos los diámetros y flujos de manera simultánea mediante el uso de vectores y usando el método de Newton - Raphson. Esta función de muestra a continuación.

```

function [ff] =ff(e,Q,D,n)
%Coeficiente de rugosidad
cr=e./D;

%Número de Reynolds
Re=4.*abs(Q)./(pi.*D.*n);

%Valor inicial propuesto x=1/sqrt(f)
x=6;

%Ecuación de Colebrook-White
F=x+2*log10((cr./3.7)+(2.5./Re).*x);

while abs(F)>0.0001

    %Ecuación de Colebrook-White
    F=x+2*log10((cr./3.7)+(2.51./Re).*x);

    %Primera derivada de la ecuación de Colebrook-White
    dF=1+2*((2.51./Re)/(log(10)*((cr./3.7)+(2.5./Re).*x)));

    %Ecuación de Newton - Raphson
    xn=x-(F./dF);
    x=xn;
end

ff=(1./x).^2;

end

```

2.4 Base de datos

En informática, una base de datos es un programa capaz de almacenar gran cantidad de datos, relacionados y estructurados, que pueden ser consultados rápidamente de acuerdo con las características selectivas que se deseen. Es posible considerar la base de datos como una especie de armario electrónico para archivar; es decir, es un depósito o contenedor de una colección de archivos de datos computarizados (Date, 2011).

La principal razón de contar con una base de datos, es que en ella se encontrarán los datos “persistentes” de una interfaz de usuario, es decir, aquellos que aunque puedan llegar a ser actualizados, serán requeridos de forma repetida muchas más veces que los datos de entrada (con los que no cuente la base de datos) o salida de la interfaz. Aunado a ello, esto permite obtener distintos beneficios de ella, tales como los siguientes:

- Compactación: No hay necesidad de archivos en papel voluminoso.
- Velocidad: La maquina puede recuperar y actualizar datos más rápido que un humano.
- Menos trabajo laborioso: Se puede eliminar gran parte del trabajo de llevar los archivos a mano. Además de evitar ingresar un gran número de datos de forma manual a la interfaz de usuario.
- Actualidad: Al momento en que se necesite se tendrá a disposición información precisa y actualizada.
- Es posible evitar (hasta cierto punto) la inconsistencia: Al proceder los datos de una misma fuente, se tendrá una consistencia en sus valores.

Asentado lo anterior, en el presente trabajo, se identificaron algunos de los datos “persistentes” en el desarrollo del método seleccionado y se ingresaron a una base de datos. De esta manera, se evitó la necesidad del cálculo de viscosidades (o su búsqueda) y la búsqueda de algunas propiedades de las tuberías en la red como su rugosidad relativa y su diámetro interior una vez determinado el NPS requerido. En la figura 13 se muestra la base de datos generada.

Base de datos para la interfaz de usuario para el análisis de redes de tubería															
Viscosidad del gas												Rugosidad absoluta		Diámetro interno	
Nombre	MM g/mol	Tc [K]	Pc [bar]	Zc	μ	μr	Tr	Fp	FQ	epsilon	Viscosidad	Material	e	NPS (Sch 40)	Diámetro interno (m)
R-12	120.913	385.100	41.300	0.280	0.500	0.004	0.792	1.000	1.000	0.004	132.896	Acero remachado	0.009144	1/2	0.016
R-134a	102.032	374.260	40.590	0.262	0.000	0.000	0.815	1.000	1.000	0.004	124.733	Concreto	0.003048	3/4	0.021
Propano	44.097	369.830	42.480	0.276	0.000	0.000	0.825	1.000	1.000	0.006	85.698	Hierro colado	0.00025908	1	0.027
Butano	58.123	425.120	37.960	0.274	0.000	0.000	0.717	1.000	1.000	0.006	77.632	Duelas de madera	0.00018288	1 1/4	0.035
Hidrógeno	2.016	33.250	12.970	0.305	0.000	0.000	9.173	1.000	-1.207	0.040	-95.531	Hierro galvanizado	0.0001524	1 1/2	0.041
Helio	4.003	5.190	2.270	0.301	0.000	0.000	58.767	1.000	1.318	0.067	197.089	Hierro colado asfaltado	1.2192E-05	2	0.052
Amoníaco	17.031	405.400	113.530	0.255	1.500	0.082	0.752	1.102	1.000	0.005	101.571	Acero comercial	0.00004572	2 1/2	0.073
Nitrógeno	28.014	126.200	33.980	0.289	0.000	0.000	2.417	1.000	1.000	0.007	181.671	Tubo estirado	1.524E-06	3	0.078
Oxígeno	31.999	154.580	50.430	0.288	0.000	0.000	1.973	1.000	1.000	0.005	208.146			3 1/2	0.090
Isobutano	58.123	407.850	36.400	0.278	0.100	0.000	0.748	1.000	1.000	0.006	79.233			4	0.102
														5	0.128
														6	0.154
														8	0.203
														10	0.255
														12	0.303

Figura 13. Base de datos

3. Casos de estudio

Como primer caso de estudio, se ingresarán a la interfaz desarrollada los datos del ejemplo 5.8 extraído de Nalluri y Featherstone 2016, el cuál enuncia lo siguiente:

En la red que se muestra en la Figura 5.10 (Figura 14), una válvula en la tubería 2-3 está parcialmente cerrada, produciendo una pérdida de carga local de $10\frac{V^2}{2g}$. La carga en el nodo 1 es

100 m de agua. La rugosidad de todas las tuberías es de 0,06 mm. Las longitudes de tubería están dadas en metros y las descargas de demanda en litros por segundo.

Los diámetros de tubería son: tuberías 1-2 y 1-6, 250 mm; tubería 6-5, 200 mm; tuberías 2-3 y 4-5, 150 mm; y tuberías 2-5 y 3-4, 100 mm. Analice la red utilizando el método de gradiente.

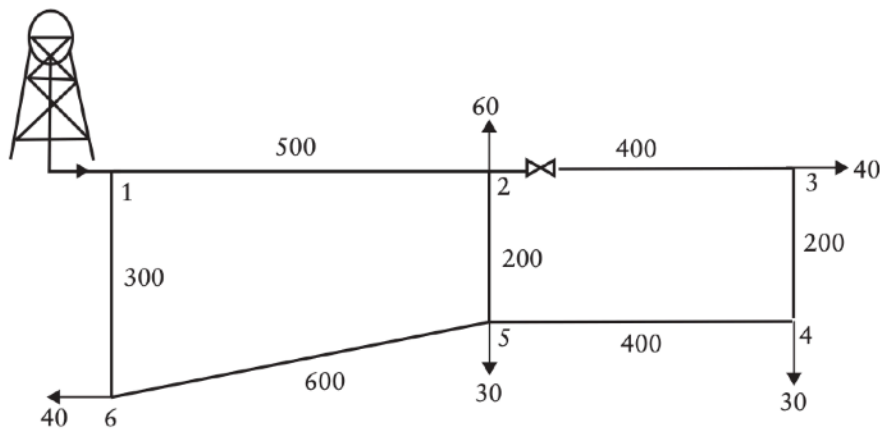


Figura 14. Red caso 1 (red de tuberías con pérdida de carga por fricción en una válvula).

Antes de comenzar el proceso iterativo, se deberán asumir los flujos en cada tubería. Como se ha mencionado anteriormente, el método empleado permite asumir cualquier flujo inicial en las tuberías sin afectar la velocidad con que se resuelve, esto permite omitir este paso en la interfaz al asumir un valor aleatorio para los flujos en las tuberías dentro del código. Este valor aleatorio es distinto al asumido en el presente ejemplo (igual a 100 para todas las tuberías), lo que permitirá evaluar si esto afecta la velocidad de solución y/o los resultados.

Antes de ingresar los datos a la interfaz, se deberá realizar un análisis para asumir una dirección de los flujos en las tuberías. Si estos se asumen de manera incorrecta, habrán resultados negativos en los flujos calculados por el código, y esto permitirá hacer una nueva asunción. En la figura 15 se muestran las direcciones asumidas para este ejemplo, y en las figuras 16 - 19 se muestran los datos ingresados a la interfaz y los resultados.

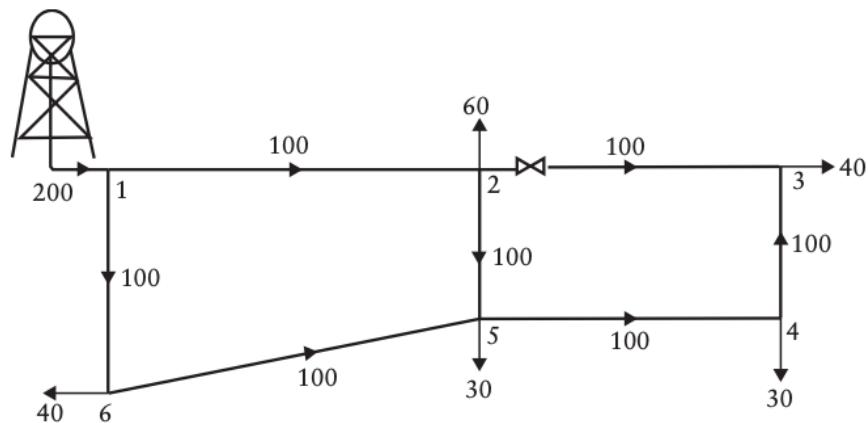


Figura 15. Dirección del flujo en las tuberías de la red caso 1.

Datos de las tuberías									
Número de tuberías	Número de tubería	Nodo inicial	Nodo final	Diferencia de altura [m]	Longitud de la tubería [m]	NPS	Diámetro de la tubería [m]	Σk_i	Flujo calculado en la tubería [L/s]
7	1-2	1	2	0	500.000		0.25	0	0.1067
	2-3	2	3	0	400.000		0.15	10	0.0366
	4-3	4	3	0	200.000		0.10	0	0.0034
	5-4	5	4	0	400.000		0.15	0	0.0334
	2-5	2	5	0	200.000		0.10	0	0.0100
	6-5	6	5	0	600.000		0.20	0	0.0533
	1-6	1	6	0	300.000		0.25	0	0.0933

Figura 16. Datos de las tuberías que componen la red caso 1.

Datos de la red					
Fluido		Temperatura [K]	Viscosidad cinemática [m ² /s]	Material tuberías	Rugosidad relativa [m]
Líquido	Agua	550	1.14E-06	Acero	0.00006

Figura 17. Datos generales de la red caso 1.

Datos cargas conocidas			
Numero de nodos	Número de nodos con carga conocida	Número de nodo con carga conocida	Carga en el nodo [m]
6	1	1	100

Figura 18. Cargas conocidas en la red caso 1.

Datos cargas desconocidas		
Número de nodo con carga desconocida	Demanda en el nodo [L/s]	Carga calculada en el nodo [m]
2	60	92.373
3	40	79.822
4	30	80.277
5	30	88.966
6	40	96.455

Figura 19. Cargas desconocidas, demandas y resultados de las cargas calculadas para la red caso 1.

Como se puede observar en la tabla 3, hubo una diferencia menor al 1% y menor al 2% en los resultados obtenidos y los resultados esperados (los obtenidos en el libro) para el flujo en las tuberías y la carga en los nodos respectivamente. Esta diferencia puede considerarse despreciable, ya que el fin de este análisis es el de llegar a una aproximación, y al comparar el procedimiento que se llevó a cabo en el libro, se determinó que esta diferencia se debe a que para este desarrollo se empleó el diagrama de Moody para la obtención del factor de fricción, mientras que en el código desarrollado se emplea la ecuación de Colebrook - White, la cuál de acuerdo a la literatura, es el más precisa que el empleo del diagrama de Moody.

Tubería	Flujo calculado en la tubería [L/s]	Flujo esperado en la tubería [L/s]	Porcentaje de diferencia
1-2	0.1067	0.1067	0.01%
2-3	0.0366	0.0366	0.09%
4-3	0.0034	0.0034	0.94%
5-4	0.0334	0.0334	0.10%
2-5	0.0100	0.0101	0.46%
6-5	0.0533	0.0533	0.03%
1-6	0.0933	0.0933	0.01%

Tabla 3. Diferencia porcentual entre los flujos calculados y esperados para la red de tuberías caso 1.

Número de nodo	Carga calculada en el nodo [m]	Carga esperada en el nodo [m]	Porcentaje de diferencia
2	92.373	92.960	0.63%
3	79.822	81.358	1.89%
4	80.277	81.780	1.84%
5	88.966	89.812	0.94%
6	96.455	96.727	0.28%

Tabla 4. Diferencia porcentual entre las cargas calculadas y esperadas para la red de tuberías caso 1.

Para el segundo caso de estudio, se diseñó una red de distribución cerrada para el agua de enfriamiento usada en los intercambiadores de calor de la planta hidrotratadora de naftas de la refinería Dos Bocas. Para ello, primero se estableció la disposición de las tuberías de acuerdo al plano de localización general de la planta (Anexo 1), y con ello, se definieron sus longitudes, alturas, y los accesorios requeridos para posteriormente obtener los coeficientes de pérdida de carga de cada uno de ellos. Posteriormente, se estimaron los caudales en cada tubería y su dirección basándose en las demandas de cada intercambiador de calor (Anexo 2), para acto seguido, calcular los diámetros requeridos en cada tubería mediante el algoritmo de cálculo mostrado en el anexo 4.

En el anexo 3 se muestra un plano isométrico de la red diseñada, el cual se esquematizó como se muestra en la figura 20. para permitir una mejor visualización de sus características principales y señalar los datos requeridos en la interfaz. Posterior a ello, se ingresaron los datos requeridos a la interfaz y se ejecutó el código obteniendo los resultados que se muestran en las figuras 21 a 24

Datos de las tuberías									
Número de tuberías	Número de tubería	Nodo inicial	Nodo final	Diferencia de altura [m]	Longitud de la tubería [m]	NPS	Diámetro de la tubería [m]	Σk	Flujo calculado en la tubería [L/s]
7	1	1	2	2.888	60.202	12	0.3032	1.1669	0.1297
	2	1	6	-4.6	19.900	10	0.2545	0.8056	0.1937
	3	2	3	-7.489	39.219	8	0.2027	2.1095	0.0985
	4	3	4	0	2.831	6	0.1541	0.0000	0.0171
	5	5	2	7.489	39.580	8	0.2027	2.1095	0.0554
	6	6	5	9.6	37.600	10	0.2545	1.6112	0.1595
	7	2	5	2.112	52.388	2	0.0525	2.9534	0.0016

Figura 21. Datos de las tuberías que componen la red caso 2.

Datos de la red					
Fluido		Temperatura [K]	Viscosidad cinemática [m ² /s]	Material tuberías	Rugosidad relativa [m]
Líquido	Agua	305	0.0008	Acero comercial	4.572E-05

Figura 22. Datos generales de la red caso 2.

Datos cargas conocidas			
Numero de nodos	Número de nodos con carga conocida	Número de nodo con carga conocida	Carga en el nodo [m]
6	1	1	70

Figura 23. Cargas conocidas en la red caso 2.

Datos cargas desconocidas		
Número de nodo con carga desconocida	Demanda en el nodo [L/s]	Carga calculada en el nodo [m]
2	84.9649	70.3765
3	81.4433	55.6573
4	17.0725	55.5589
5	105.6937	65.6829
6	34.2281	61.4661

Figura 24. Cargas desconocidas, demandas y resultados de las cargas calculadas para la red caso 2.

Aunado al presente caso de estudio, se volvió a ejecutar el código de programación tras haber eliminado la diferencia de altura en los nodos, lo cual permitió apreciar la diferencia en los resultados que se genera al no tomar en cuenta este parámetro. Como se muestra en la figura 25, al no considerar este parámetro, el flujo calculado en la tubería 5 resultó negativo, lo que quiere decir que la dirección del flujo asumida fue incorrecta, por lo que se realizó una nueva asunción y se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras 26 y 27. Posteriormente, en las tablas 5 y 6, se muestra la diferencia porcentual entre los resultados obtenidos al considerar la diferencia de altura entre los nodos y al no considerarla.

Datos de las tuberías									
Número de tuberías	Número de tubería	Nodo inicial	Nodo final	Diferencia de altura [m]	Longitud de la tubería [m]	NPS	Diámetro de la tubería [m]	Σk_i	Flujo calculado en la tubería [L/s]
7	1	1	2	0	60.202	12	0.3032	1.1669	0.1885
	2	1	6	0	19.900	10	0.2545	0.8056	0.1349
	3	2	3	0	39.219	8	0.2027	2.1095	0.0985
	4	3	4	0	2.831	6	0.1541	0.0000	0.0171
	5	5	2	0	39.580	8	0.2027	2.1095	-0.0050
	6	6	5	0	37.600	10	0.2545	1.6112	0.1007
	7	2	5	0	52.388	2	0.0525	2.9534	0.0000

Figura 25. Datos de las tuberías que componen la red caso 2 descartando la diferencia de altura entre los nodos.

Datos de las tuberías									
Número de tuberías	Número de tubería	Nodo inicial	Nodo final	Diferencia de altura [m]	Longitud de la tubería [m]	NPS	Diámetro de la tubería [m]	Σk_i	Flujo calculado en la tubería [L/s]
7	1	1	2	0	60.202	12	0.3032	1.1669	0.1874
	2	1	6	0	19.900	10	0.2545	0.8056	0.1360
	3	2	3	0	39.219	8	0.2027	2.1095	0.0985
	4	3	4	0	2.831	6	0.1541	0.0000	0.0171
	5	2	5	0	39.580	8	0.2027	2.1095	0.0038
	6	6	5	0	37.600	10	0.2545	1.6112	0.1018
	7	2	5	0	52.388	2	0.0525	2.9534	0.0001

Figura 26. Datos de las tuberías que componen la red caso 2 descartando ΔZ 's entre los nodos y corrigiendo direcciones de flujos.

Datos cargas desconocidas		
Número de nodo con carga desconocida	Demanda en el nodo [L/s]	Carga calculada en el nodo [m]
2	84.9649	65.3041
3	81.4433	57.9810
4	17.0725	57.8806
5	105.6937	65.2537
6	34.2281	67.8139

Figura 27. Cargas desconocidas, demandas y resultados de las cargas calculadas para la red caso 2 descartando ΔZ 's entre los nodos.

Tubería	Flujo calculado considerando ΔZ's	Flujo calculado sin considerar ΔZ's	Porcentaje de diferencia
1	0.1874	0.1297	30.79%
2	0.1360	0.1937	42.43%
3	0.0985	0.0985	0.00%
4	0.0171	0.0171	0.00%
5	0.0038	0.0554	1357.89%
6	0.1018	0.1595	56.68%
7	0.0001	0.0016	1500.00%

Tabla 5. Diferencia porcentual entre el flujo calculado al considerar ΔZ 's entre los nodos y al no considerarlas en red de tuberías caso 2.

Número de nodo	Carga calculada considerando ΔZ's	Carga calculada sin considerar ΔZ's	Porcentaje de diferencia
2	65.304	70.376	7.77%
3	57.981	55.657	4.01%
4	57.881	55.559	4.01%
5	65.254	65.683	0.66%
6	67.814	61.466	9.36%

Tabla 6. Diferencia porcentual entre la carga calculada al considerar ΔZ 's entre los nodos y al no considerarlas en red de tuberías caso 2.

4. Conclusiones

Entre los métodos de solución de redes de distribución cerradas que se emplean con mas frecuencia, el mejor es el método del gradiente hidráulico al emplearse equipos de cómputo.

El código programado arroja los mismos resultados que los obtenidos al realizar el procedimiento a mano.

Se obtienen resultados considerablemente distintos al considerar las diferencias de altura entre los nodos de la red y al no considerarlas.

Sólo se requiere ingresar a la interfaz datos de una red de distribución conocida para darle solución a la misma.

Referencias.

1. Bird, Stewart y Lightfoot (2002). "Transport Phenomena". 2a edición, Wiley.
2. CONAGUA. (DICIEMBRE, 2017). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. CONAGUA. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/Libros/43RedesDeDistribucion.pdf>
3. Date, C. (2011) Introducción a los sistemas de bases de datos. Pearson Education.
4. Granados, A. (Enero, 2016). METODOS NUMÉRICOS PARA REDES. Research Gate. https://www.researchgate.net/publication/291167260_Metodos_Numericos_Para_Redes
5. Gutierrez, J. (Agosto, 2011). HISTORIA DE LOS METODOS DE ANALISIS y MODELOS COMPUTACIONALES PARA ANÁLISIS DE REDES DE DISTRIBUCIÓN A PRESIÓN. <https://bit.ly/3oPXuyh>
6. Incropera, F. (2006). Fundamentos de transferencia de calor (4a ed.). Prentice Hall/Pearson.
7. Jeppson, R. W. (1976). Steady Flow analysis of pipe networks: An instructional manual (1.a ed.). Butterworth-Heinemann.
8. Martínez, L. (2016). Propuesta de rehabilitación para la red de abasto de agua potable de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas [TRABAJO DE DIPLOMA]. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
9. Menczer, F., Fortunato, S., & Davis, C. A. (2020). A First Course in Network Science. Cambridge University Press.
10. Mendéz V. (2007). Tuberías a presión. Publicaciones UCAB.
11. Mora, D. (2012). DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA MEDIANTE ALGORITMOS EVOLUTIVOS. ANÁLISIS DE EFICIENCIA. [Tesis de doctorado no publicada]. Universidad Politécnica de Valencia.
12. Munson, B., Young, D., & Okiishi, T. (2005). Fundamentos de la mecánica de fluidos (5a ed.).
13. John Wiley & Sons. Muñoz, J. (Noviembre, 2016). ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD EN MEZCLAS MULTICOMPONENTE GASEOSAS. ELABORACIÓN DE UN CÓDIGO

MATLAB PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

14. Perry (2004). "Manual del Ingeniero Químico". 7a edición, McGraw-Hill.
15. Pippenger, J. J., & Hicks, T. (1979). Industrial hydraulics (3a ed.). Glencoe/Mcgraw-Hill.
16. Poling, B., Prausnitz, J., & O'Connell, J. (2000). The properties of gases and liquids (5th ed.). McGraw-Hill.
17. Ramalingam, D., Lingireddy, S., & Ormsbee, L. E. (2002). History of Water Distribution Network Analysis: Over 100 Years of Progress. Environmental and Water Resources History. doi:10.1061
18. Riaño F. y Lorence M. (2010). Algunas consideraciones sobre el punto de operación de una bomba y su determinación matemática, Ingeniería Hidráulica. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
19. Saldarriaga, J. (2016). Hidráulica de tuberías: Abastecimientos de agua, redes, riego (3a ed.). Alfaomega.
20. Sotelo, G. (2015). Hidráulica general: Fundamentos (1.a ed., Vol. 1). LIMUSA.
21. Stoecker, W. (1998). Industrial Refrigeration Handbook (Illustrated ed.). McGraw-Hill Companies.
22. Welty, Wicks y Wilson (1997). "Fundamentos de Transferencia de Momento, Calor y Masa", Limusa.
23. White, F. (2010). Fluid mechanics (7th ed.). McGraw-Hill. Williams, H. (1995). Manual de hidráulica (1.a ed.). McGraw-Hill.

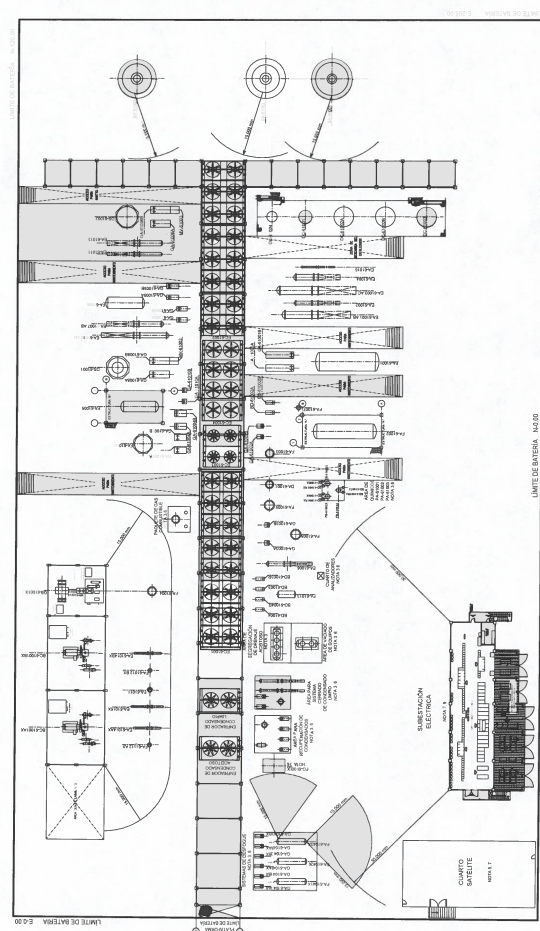
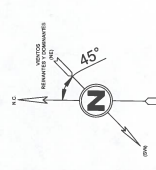
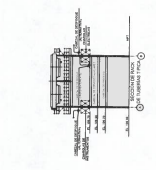
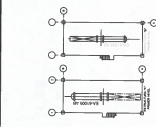
NOTAS

1. Este plano muestra la localización general de los equipos de la Refinería Dos Bocas, en el Estado de México, y se refiere a la planta hidrocarburos.

2. Este plano muestra la localización general de los equipos de la Refinería Dos Bocas, en el Estado de México, y se refiere a la planta hidrocarburos.

3. Este plano muestra la localización general de los equipos de la Refinería Dos Bocas, en el Estado de México, y se refiere a la planta hidrocarburos.

4. Este plano muestra la localización general de los equipos de la Refinería Dos Bocas, en el Estado de México, y se refiere a la planta hidrocarburos.



LISTA DE EQUIPO

GRUPO	IDENTIFICACION	DESCRIPCION	COMPROBACION
CORPO SALINACIONES Y ALBERGONES	1	ALBERGON	
	2	ALBERGON	
	3	ALBERGON	
	4	ALBERGON	
TANQUES Y TANQUETES	1	TANQUE	
	2	TANQUE	
	3	TANQUE	
	4	TANQUE	
BOMBAS	1	BOMBA	
	2	BOMBA	
	3	BOMBA	
	4	BOMBA	
MOTORES	1	MOTOR	
	2	MOTOR	
	3	MOTOR	
	4	MOTOR	

ESCALA 1:100

REFINERIA DOS BOCAS
Planta Hidrocarburos
Plano de Localización General de Equipo

203-K-012-1001




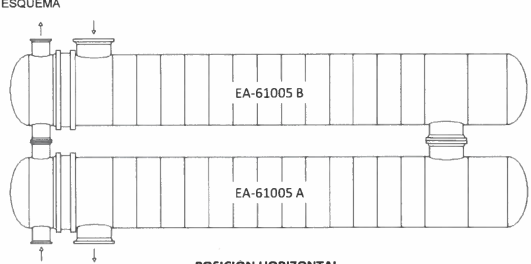
FECHA	ELABORADO	REVISADO	APROBADO

FECHA	ELABORADO	REVISADO	APROBADO


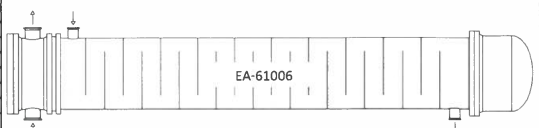
FECHA	ELABORADO	REVISADO	APROBADO



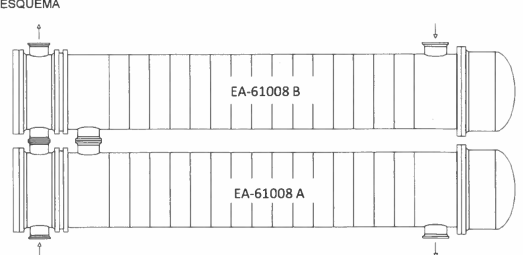
FECHA	ELABORADO	REVISADO	APROBADO


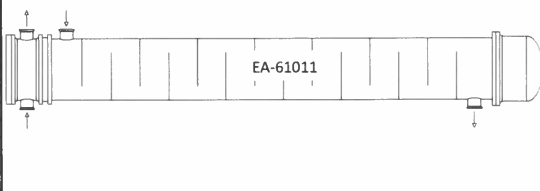
5. Anexos


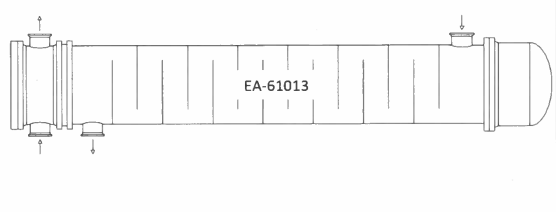
 INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO		<h2>PTI-ID</h2>			HD-203-A-1015_0		HOJA No. 1 de 5			
HOJA DE DATOS CAMBIADORES DE CALOR TIPO: HAZ DE TUBOS Y ENVOLVENTE							PROYECTO: F.62635			
"Actualización del Paquete de Diseño de Proceso para las Unidades Hidrotradoras de Naftas (HDN), en la Refinería en Dos Bocas, Paraíso, Tabasco"										REV.
PLANTA					CLAVE DE LA UNIDAD			EA-61005 AB		
LOCALIZACIÓN				FABRICANTE			DTI REFERENCIA			
SERVICIO DE LA UNIDAD					No. DE UNIDADES		UNA			
TAMAÑO		mm		TIPO		BEU		CONECTADO EN: PARALELO 1 SERIE 2		
ÁREA (GR/EF) POR UNIDAD		1,285 / 1,250		m ² No. ENV. / UNIDAD		2		ÁREA (GR/EF) POR ENVOLVENTE 643 / 625 m ²		
CONDICIONES DE OPERACIÓN (1)										
					LADO ENVOLVENTE			LADO TUBOS		
					ENTRADA		SALIDA		ENTRADA	SALIDA
NOMBRE DEL FLUIDO					EFLUENTE DEL REACTOR DE HDT			AGUA DE ENFRIAMIENTO		
CANTIDAD TOTAL DE FLUJO DE FLUIDO					kg/h		296,598 x 1.1 (2) (6)		378,709 x 1.1 (2)	
VAPOR					kg/h		26,480		22,836	
LÍQUIDO					kg/h		299,778		303,422	
VAPOR DE AGUA					kg/h					
AGUA					kg/h				416,580	
NO CONDENSABLES (PESO MOLECULAR)					kg/h				416,580	
TEMPERATURA					°C		55.0		38.0	
DENSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)					kg/m ³		6.4 / 723.6		5.8 / 737.3	
VISCOSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)					cP		0.0101 / 0.3400		0.0093 / 0.4099	
CALOR ESPECÍFICO (VAPOR / LÍQUIDO)					kcal/kg °C		2.2061 / 0.5362		2.4828 / 0.5211	
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (VAPOR / LÍQUIDO)					kcal/h m °C		0.1065 / 0.1057		0.1090 / 0.1099	
CALOR LATENTE ESPECÍFICO					kcal/kg					
PRESIÓN DE ENTRADA (atm. 1.03 kg/cm ²)					kg/cm ² g		53.4		6.0	
VELOCIDAD					m/s		2.59		0.81	
CAIDA DE PRESIÓN (PERMISIBLE / CALCULADA)					kg/cm ²		0.40		0.24	
RESISTENCIA DE ENSUCIAMIENTO					h m ² °C/kcal		0.0004		0.0006	
COEFICIENTE PROMEDIO DE PELÍCULA					kcal/h m ² °C		1,188.5		3,807.0	
CALOR INTERCAMBIADO					10 ³ kcal/h		3.8 x 1.1 (2)		MTD (CORREGIDA) 8.3 °C	
COEF. TOTAL DE TRANSF. DE CALOR (REQ. / CALC. / LIMPIO)					kcal/h m ² °C		402.6		411.8	
ρv ² (kg/(m s ²)): BOQUILLA DE ENTRADA ENVOLVENTE					ENTRADA A LA ENV.		2,079		2,639	
ρv ² (kg/(m s ²)): BOQUILLA DE SALIDA ENVOLVENTE					SALIDA DE LA ENV.		941			
CONSTRUCCIÓN POR ENVOLVENTE (7) (8) (10)										
No. TUBOS					734 Us (9)		D.E.		19.05 mm	
ESPESOR					1.651 mm		MINIMO / PROMEDIO		MINIMO	
PASO					28.58 mm		ARREGLO TUBOS		45°	
LONGITUD					7,315 mm		TIPO		LISO	
UNIÓN TUBO - ESPEJO					EXPANSIONADA CON DOS RANURAS		Salida		1 - D.N. 600-600 C.S.J.T.A.	
DIÁMETRO ENVOLVENTE (DI / DE)					1,372 / mm		Venteo		1 - D.N. 300-300 C.S.C.R.	
TIPO DE DEFLECTOR TRANSVERSAL					DOBLE SEGMENTADA (CORTE VERTICAL)		Dren			
SEPARACIÓN: C/C					431.9 mm		No. DE PASOS CRUZADOS		15	
% CORTE					27.2		P. alivio		kg/cm ² g	
TIPO SOPORTE DE TUBO					VACÍO		PRESIÓN DE DISEÑO		kg/cm ² g	
TIPO SELLO DEFLECTOR LONG					TEMP. DE DISEÑO (MAX / MDMT)		°C		170 / 10	
FAJA DE SELLO / NUMERO					No. PASOS		CORROSIÓN PERMISIBLE		mm	
PLACA DE CHOQUE					Si		0.0		1	
PLACA DE CHOQUE					Si		0.0		2	
PLACA DE CHOQUE					Si		0.0		3.2	
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN										
ENVOLVENTE					SA-516-70 (5)		TUBOS		SA-213 TP347	
TAPA ENVOLVENTE					SA-516-70 (5)		EMPAQUES:		LADO ENVOLVENTE	
CANAL					SA-516-70		LADO TUBOS		NO ASBESTO RECUBIERTO DE AC. INOX. 347	
TAPA CANAL					SA-516-70		CABEZAL FLOTANTE		NO ASBESTO RECUBIERTO DE AC. SUAVE	
TAPA CABEZAL FLOTANTE					---		JUEGOS DE REPUESTO REQ.		---	
ESPEJO					SA-266-Gr. 4 (11)		FLOTANTE		---	
DEFLECTORES: TRANSVERSALES					SA-240-347		LONG.		---	
MATERIAL SOPORTE DE TUBOS					SA-240-347		CANAL DE ENTRADA / SALIDA		PROTECCIÓN AL PERSONAL (4) (mm)	
TIPO JUNTA DE EXPANSIÓN					MATERIAL JUNTA DE EXPANSIÓN		PLACA DE CHOQUE		SA-240 347 (mm)	
NORMA DE DISEÑO					ET-090-PEMEX		CÓDIGO (3)		ASME VIII, DIV. 1	
PESOS APROX. / ENVOLVENTE					VACÍO		33,189		HAZ DE TUBOS	
									11,744	
									LLENO DE AGUA	
									48,297	
									kg	
NOTAS:										
(1) CASO CRÍTICO DE OPERACIÓN: INICIO DE CORRIDA										
(2) INCLUYE 10% DE SOBREDISEÑO EN FLUJO Y CARGA TÉRMICA										
(3) SE REQUIERE ESTAMPADO ASME										
(4) DE ACUERDO A LA NORMA NOM-009-ENER-2014										
(5) CON RECUBRIMIENTO DE ACERO INOXIDABLE 347										
(6) CONTENIDO DE H ₂ S Y NH ₃ : 4.265 Y 906 PPM MOLAR, RESPECTIVAMENTE										
(7) EL DISEÑO POR SISMO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA CFE ED. 2015 Y EL DISEÑO POR VIENTO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA CFE ED. 2008										
(8) PARA EL CASO DE DEPRESURIZACIÓN, VERIFICAR DURANTE LA INGENIERÍA DE DETALLE EL DISEÑO MECÁNICO LADO ENVOLVENTE POR EXPANSIÓN TÉRMICA @ 155°C										
(9) REQUIERE SOPORTE COMPLETO EN CURVATURA DE TUBOS EN "U"										
(10) COLOCAR SOPORTES CONTRA VIBRACIÓN EN LAS TRES PRIMERAS HILERAS DE TUBOS EN ENTRADA Y SALIDA DE BOQUILLAS										
(11) CON RECUBRIMIENTO DE ACERO INOXIDABLE 347 LADO ENVOLVENTE										
					ESQUEMA POSICIÓN HORIZONTAL					
REVISIÓN EDICIÓN FECHA ELABORÓ REVISÓ APROBÓ					A PRE. Mar. 17, 2020 ILE MCF FEO					
A1 PRE. Abr. 06, 2020 ILE MCF FEO					B APL. COMENTARIOS Abr. 24, 2020 ILE MCF FEO					
0 APD Mayo 27, 2020 ILE MCF FEO										

Anexo 1. PLG de la planta hidrotadora de naftas Refinería Dos Bocas, Tabasco.

		<h1>PTI-ID</h1>		HD-203-A-1016_1		HOJA No. 1 de 4		
				HOJA DE DATOS CAMBIADORES DE CALOR TIPO: HAZ DE TUBOS Y ENVOLVENTE		PROYECTO: F.62635		
"Actualización del Paquete de Diseño de Proceso para las Unidades Hidrotadoras de Naftas (HDN), en la Refinería en Dos Bocas, Paraiso, Tabasco"								REV.
PLANTA		PLANTA HIDROTRADORA DE NAFTA, (U-61000)		CLAVE DE LA UNIDAD		EA-61006		
LOCALIZACIÓN		REFINERÍA DOS BOCAS, PARAÍSO, TAB.		FABRICANTE		DTI REFERENCIA		
SERVICIO DE LA UNIDAD		ENFRIADOR DE AMINA POBRE		No. DE UNIDADES		UNA		
TAMAÑO		889 x 4,877 mm		TIPO		AES		
ÁREA (GR/EF) POR UNIDAD		231 / 226 m ²		No. ENV. / UNIDAD		1		
				ÁREA (GR/EF) POR ENVOLVENTE		231 / 226 m ²		
CONDICIONES DE OPERACIÓN (1)								
				LADO ENVOLVENTE		LADO TUBOS		
				ENTRADA		SALIDA		
				AMINA POBRE		AGUA DE ENFRIAMIENTO		
NOMBRE DEL FLUIDO								
CANTIDAD TOTAL DE FLUJO DE FLUIDO								
VAPOR								
LÍQUIDO								
VAPOR DE AGUA								
AGUA								
NO CONDENSABLES (PESO MOLECULAR)								
TEMPERATURA								
DENSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)								
VISCOSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)								
CALOR ESPECÍFICO (VAPOR / LÍQUIDO)								
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (VAPOR / LÍQUIDO)								
CALOR LATENTE ESPECÍFICO								
PRESIÓN DE ENTRADA (atm. 1.03 kg/cm ²)								
VELOCIDAD								
CAÍDA DE PRESIÓN (PERMISIBLE / CALCULADA)								
RESISTENCIA DE ENSUCIAMIENTO								
COEFICIENTE PROMEDIO DE PELÍCULA								
CALOR INTERCAMBIADO								
COEF. TOTAL DE TRANSF. DE CALOR (REQ. / CALC. / LIMPIO)								
ρv ² [kg/(m s ²)] BOQUILLA DE ENTRADA ENVOLVENTE		1,507		ENTRADA A LA ENV.		961		
				SALIDA DE LA ENV.		359		
CONSTRUCCIÓN POR ENVOLVENTE (3)								
No. TUBOS		790		D.E.		19.05 mm		
ESPESOR		2.108 mm		MINIMO / PROMEDIO		MINIMO		
PASO		25.40 mm		ARREGLO TUBOS		90°		
LONGITUD		4.877 mm		TIPO		LISO		
UNIÓN TUBO - ESPEJO				EXPANSIONADA CON DOS RANURAS				
DIÁMETRO ENVOLVENTE (DI / DE)		889 / mm		Entrada		1 - D.N. 100-150 C.S.C.R.		
TIPO DE DEFLECTOR TRANSVERSAL				Salida		1 - D.N. 150-150 C.S.C.R.		
SEPARACIÓN: C/C		210.9 mm		No. DE PASOS CRUZADOS		21		
% CORTE		18.9		P. alivio		kg/cm ² g		
TIPO SOPORTE DE TUBO				PRESIÓN DE DISEÑO		kg/cm ² g		
TIPO SELLO DEFLECTOR LONG				VACÍO		kg/cm ² a		
FAJA DE SELLO / NUMERO				TEMP. DE DISEÑO (MAX / MDMT)		°C		
PLACA DE CHOQUE		Si		CORROSIÓN PERMISIBLE		mm		
						6.4		
						1		
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (5) (8)								
ENVOLVENTE		SA-516 70		TUBOS		SA-179		
TAPA ENVOLVENTE		SA-516 70		EMPAQUES:				
CANAL		SA-516 70		LADO ENVOLVENTE		NO ASBESTO RECUBIERTO DE AC. SUAVE		
TAPA CANAL		SA-516 70		LADO TUBOS		NO ASBESTO RECUBIERTO DE AC. SUAVE		
TAPA CABEZAL FLOTANTE		SA-516 70		CABEZAL FLOTANTE		NO ASBESTO RECUBIERTO DE AC. SUAVE		
ESPEJO		SA-516 70		JUEGOS DE REPUESTO REQ.				
DEFLECTORES: TRANSVERSALES		SA-516 70		ANILLO DE PRUEBA REQ. (SI/NO)				
MATERIAL SOPORTE DE TUBOS		SA-516 70		AISLAMIENTO: ENVOLVENTE		PROTECCIÓN AL PERSONAL (4) (mm)		
TIPO JUNTA DE EXPANSIÓN				CANAL DE ENTRADA / SALIDA		(mm)		
NORMA DE DISEÑO		ET-090-PEMEX		MATERIAL JUNTA DE EXPANSIÓN		SA-516 70		
PESOS APROX. / ENVOLVENTE		VACÍO 7,373		CÓDIGO (3)		ASME VIII, DIV. 1		
				HAZ DE TUBOS		4,561		
				CALC. MAWP (SI / NO)		SI		
				LLENO DE AGUA		10,609		
				CLASE TEMA		R		
				kg				
NOTAS:								
(1) ESTE EQUIPO CUMPLE CON LOS CASOS DE OPERACIÓN INICIO Y FIN DE CORRIDA								
(2) INCLUYE 20% DE SOBREDISEÑO EN FLUJO Y CARGA TÉRMICA								
(3) SE REQUIERE ESTAMPADO ASME								
(4) DE ACUERDO A LA NORMA NOM-009-ENER-2014								
(5) EL DISEÑO POR SISMO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA CFE ED. 2015 Y EL DISEÑO POR VIENTO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA CFE ED. 2008								
(6) SE REQUIERE CONEXIONES PARA VENTEO Y DREN EN LA TAPA DE LA ENVOLVENTE DE DN 20, CLASE 6000 COUPLE NPT								
(7) SE REQUIERE COLOCAR EN LAS BOQUILLAS DE ENTRADA Y SALIDA LADO ENVOLVENTE Y LADO TUBOS								
UNA CONEXIÓN DN 20 CLASE 6000 COUPLE NPT PARA MANOMETRO								
UNA CONEXIÓN DN 25 CLASE 6000 COUPLE NPT PARA TERMOMETRO								
(8) EL MATERIAL DE ACERO AL CARBONO LADO ENVOLVENTE DEBE SER RESISTENTE AL AGRIETAMIENTO INDUCIDO POR HIDRÓGENO (HI)								
				ESQUEMA				
								
				POSICIÓN HORIZONTAL				
REVISIÓN: A, B, 0, 1, APD								
EDICIÓN: PRE, APL. COMENTARIOS, ILE								
FECHA: Mar. 17, 2020, Abr. 17, 2020, Mayo 27, 2020, Agosto 24, 2020								
ELABORÓ: ILE, MCF, FEO								
REVISÓ: MCF, FEO								
APROBÓ: FEO								

 PTI-ID		HD-203-A-1018_0	HOJA No. 1 de 5
		HOJA DE DATOS CAMBIADORES DE CALOR TIPO: HAZ DE TUBOS Y ENVOLVENTE	
PROYECTO: F.62635			REV.
"Actualización del Paquete de Diseño de Proceso para las Unidades Hidrotradoras de Naftas (HDN), en la Refinería en Dos Bocas, Paraíso, Tabasco"			
FLANTA	PLANTA HIDROTRADADORA DE NAFTAS, (U-61000)	CLAVE DE LA UNIDAD	EA-61008 AB
LCCALIZACIÓN	REFINERÍA DOS BOCAS, PARAÍSO, TAB.	FABRICANTE	DTI REFERENCIA
SERVICIO DE LA UNIDAD	CONDENSADOR CON AGUA DE LA TORRE ESTABILIZADORA	No. DE UNIDADES	UNA
TAMAÑO	1,067 x 6,096 mm	TIPO	AES
ÁREA (GR/EF) POR UNIDAD	851 / 834 m ²	No. ENV. / UNIDAD	2
		ÁREA (GR/EF) POR ENVOLVENTE	425 / 417 m ²
CONDICIONES DE OPERACIÓN (1)			
		LADO ENVOLVENTE	
		ENTRADA	SALIDA
		DOMOS DE ESTABILIZADORA	
		LADO TUBOS	
		ENTRADA	SALIDA
		AGUA DE ENFRIAMIENTO	
NOMBRE DEL FLUIDO			
CANTIDAD TOTAL DE FLUJO DE FLUIDO	kg/h	85,164 x 1.1 (2)	304,436 x 1.1 (2)
VAPOR	kg/h	22,319	4,081
LÍQUIDO	kg/h	71,361	89,598
VAPOR DE AGUA	kg/h		
AGUA	kg/h		334,880
NO CONDENSABLES (PESO MOLECULAR)	kg/h		334,880
TEMPERATURA	°C	55.0	35.0
DENSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)	kg/m ³	23.1	526.8
VISCOSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)	cP	0.0100	0.1100
CALOR ESPECÍFICO (VAPOR / LÍQUIDO)	kcal/kg °C	0.4530	0.6270
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (VAPOR / LÍQUIDO)	kcal/h m °C	0.0210	0.0950
CALOR LATENTE ESPECÍFICO	kcal/kg		
PRESIÓN DE ENTRADA (atm. 1.03 kg/cm ²)	kg/cm ² g		11.8
VELOCIDAD	m/s		1.11
CAÍDA DE PRESIÓN (PERMISIBLE / CALCULADA)	kg/cm ²	0.70	0.33
RESISTENCIA DE ENSUCIAMIENTO	h m ² °C/kcal		0.0004
COEFICIENTE PROMEDIO DE PELÍCULA	kcal/h m ² °C		1,116.4
CALOR INTERCAMBIADO	10 ⁶ kcal/h		2.3 x 1.1 (2)
COEF. TOTAL DE TRANSF. DE CALOR (REQ. / CALC. / LIMPIO)	kcal/h m ² °C		381.9
ρv ² (kg/m s ²): BOQUILLA DE ENTRADA ENVOLVENTE		1,586	
		ENTRADA A LA ENV.	1,163
		SALIDA DE LA ENV.	1,249
CONSTRUCCIÓN POR ENVOLVENTE (3)			
No. TUBOS	1166	D.E.	19.05 mm
ESPESOR	2.108 mm	MINIMO / PROMEDIO	MÍNIMO
PASO	25.40 mm	ARREGLO TUBOS	90°
LONGITUD	6.096 mm	TIPO	LISO
UNIÓN TUBO - ESPEJO	EXPANSIONADA CON DOS RANURAS		
DIÁMETRO ENVOLVENTE (DI / DE)	1,067 / mm		
TIPO DE DEFLECTOR TRANSVERSAL	SEGMENTADA (CORTE VERTICAL)		
SEPARACIÓN: C/C	302.1 mm	No. DE PASOS CRUZADOS	17
% CORTE	26.2	PRESIÓN DE DISEÑO	14.3
TIPO SOPORTE DE TUBO	VACIO		
TIPO SELLO DEFLECTOR LONG	TEMP. DE DISEÑO (MAX / MDMT)	°C	85 / 10
FAJA DE SELLO / NUMERO	No. PASOS		1
PLACA DE CHOQUE	SI	CORROSIÓN PERMISIBLE	6.4
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN (3)			
ENVOLVENTE	SA-516 70	TUBOS	SA-213 TP316L
TAPA ENVOLVENTE	SA-516 70		
CANAL	SA-516 70		
TAPA CANAL	SA-516 70		
TAPA CABEZAL FLOTANTE	SA-516 70		
ESPEJO	SA-266 Gr. 4 (5)	FLOTANTE	SA-266 Gr. 4 (5)
DEFLECTORES: TRANSVERSALES	SA-516 70	LONG.	---
MATERIAL SOPORTE DE TUBOS	SA-516 70		
TIPO JUNTA DE EXPANSIÓN	MATERIAL JUNTA DE EXPANSIÓN		PLACA DE CHOQUE SA-516 70
NORMA DE DISEÑO	ET-490-PEMEX	CÓDIGO (4)	ASME VIII, DIV. 1
PESOS APROX. / ENVOLVENTE	VACIO	12,838	8,015
		HAZ DE TUBOS	18,703
		LLENO DE AGUA	kg
NOTAS:			
(1) CASO DE DISEÑO. FIN DE CORRIDA			
(2) INCLUYE 10% DE SOBREDISEÑO EN FLUJO Y CARGA TÉRMICA			
(3) EL DISEÑO POR SISMO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA CFE ED. 2015 Y EL DISEÑO POR VIENTO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA CFE ED. 2008			
(4) SE REQUIERE ESTAMPADO ASME			
(5) RECUBIERTO DE ACERO INOXIDABLE 316 L (LADO TUBOS)			
(6) SE REQUIEREN CONEXIONES PARA VENTEO Y DREN EN LA TAPA DE LA ENVOLVENTE:			
DN 20, CLASE 6000, COPLÉ NPT			
(7) SE REQUIERE COLOCAR EN LAS BOQUILLAS DE ENTRADA Y SALIDA LADO ENVOLVENTE Y LADO TUBOS:			
UNA CONEXIÓN DN 20, CLASE 6000, COPLÉ NPT PARA MANÓMETRO			
UNA CONEXIÓN DN 25, CLASE 6000, COPLÉ NPT PARA TERMÓMETRO			
			
POSICIÓN HORIZONTAL			
REVISIÓN	A	B	0
EDICIÓN	PRE.	APL. COMENTARIOS	APD
FECHA	Mar. 17, 2020	Abr. 17, 2020	Mayo 27, 2020
ELABORÓ	JAHG	JAHG	JAHG
REVISÓ	MCF	MCF	MCF
APROBO	FEO	FEO	FEO

 IMP INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO	<h1 style="text-align: center;">PTI-ID</h1>	HD-203-A-1020_1	HOJA No. 1 de 4	
		HOJA DE DATOS CAMBIADORES DE CALOR TIPO: HAZ DE TUBOS Y ENVOLVENTE		PROYECTO: F.62635
"Actualización del Paquete de Diseño de Proceso para las Unidades Hidrotratadoras de Naftas (HDN), en la Refinería en Dos Bocas, Paraíso, Tabasco"				REV.
PLANTA	PLANTA HIDROTRATADORA DE NAFTA(S), (U-61000)		CLAVE DE LA UNIDAD	EA-61011
LOCALIZACIÓN	REFINERÍA DOS BOCAS, PARAÍSO, TAB.	FABRICANTE	DTI REFERENCIA	
SERVICIO DE LA UNIDAD	ENFRIADOR DE NAFTA LIGERA PRODUCTO		No. DE UNIDADES	UNA
TAMAÑO	787 x 6,096	mm	TIPO	AES
ÁREA (GR/EF) POR UNIDAD	215 / 210	m ²	No. ENV. / UNIDAD	1
			ÁREA (GR/EF) POR ENVOLVENTE	215 / 210 m ²
CONDICIONES DE OPERACIÓN (1)				
NOMBRE DEL FLUIDO	LADO ENVOLVENTE		LADO TUBOS	
	ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
CANTIDAD TOTAL DE FLUJO DE FLUIDO	NAFTA LIGERA		AGUA DE ENFRIAMIENTO	
	60,165 x 1.1 (2)		61,172 x 1.1 (2)	
VAPOR				
LÍQUIDO	66,182	66,182		
VAPOR DE AGUA				
AGUA			67,289	67,289
NO CONDENSABLES (PESO MOLECULAR)				
TEMPERATURA	60.0	42.0	32.0	42.0
DENSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)	kg/m ³	624.9	642.7	995.3
VISCOSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)	cP	0.2100	0.2400	0.7645
CALOR ESPECÍFICO (VAPOR / LÍQUIDO)	kcal/kg °C	0.5701	0.5510	0.9986
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (VAPOR / LÍQUIDO)	kcal/h m °C	0.1020	0.1070	0.5316
CALOR LATENTE ESPECÍFICO	kcal/kg			0.5430
PRESIÓN DE ENTRADA (atm. 1.03 kg/cm ²)	kg/cm ² g	16.5	6.0	
VELOCIDAD	m/s	0.25	1.17	
CAÍDA DE PRESIÓN (PERMISIBLE / CALCULADA)	kg/cm ²	0.70	0.07	0.70
RESISTENCIA DE ENSUCIAMIENTO	h m ² °C/kcal	0.0003		0.0006
COEFICIENTE PROMEDIO DE PELÍCULA	kcal/h m ² °C	511.2		4,943.6
CALOR INTERCAMBIADO	10 ⁹ kcal/h	0.61 x 1.1 (2)	MTD (CORREGIDA)	10.9 °C
COEF. TOTAL DE TRANSF. DE CALOR (REQ. / CALC. / LIMPIO)	kcal/h m ² °C	293.2	300.0	441.9
ρ ² (kg/(m s ²)): BOQUILLA DE ENTRADA ENVOLVENTE	1,913	ENTRADA A LA ENV.	1,947	SALIDA DE LA ENV.
				737
CONSTRUCCIÓN POR ENVOLVENTE (3) (4)				
No. TUBOS	588	D.E.	19.05	mm
ESPESOR	2.108	mm	MINIMO / PROMEDIO	MINIMO
PASO	25.40	mm	ARREGLO TUBOS	90°
LONGITUD	6,096	mm	TIPO	LISO
UNIÓN TUBO - ESPEJO	EXPANSIONADA CON DOS RANURAS		Entrada	1 - D.N. 150-300 C.S.C.R.
DIÁMETRO ENVOLVENTE (DI / DE)	787 /	mm	Intermedia	
TIPO DE DEFLECTOR TRANSVERSAL	SEGMENTADA (CORTE HORIZONTAL)		Salida	1 - D.N. 150-300 C.S.C.R.
SEPARACIÓN C/C	380.3	mm	Venteo	1 - D.N. 150-300 C.S.C.R.
% CORTE	22.4	No. DE PASOS CRUZADOS	Dren	
TIPO SOPORTE DE TUBO		PRESIÓN DE DISEÑO	P. alivio	kg/cm ² g
TIPO SELLO DEFLECTOR LONG		VACÍO	22.3 (8)	16.8
FAJA DE SELLO / NUMERO		TEMP. DE DISEÑO (MAX / MDMT)	VACÍO TOTAL @ 200 °C	VACÍO TOTAL @ 200 °C
PLACA DE CHOQUE	SI	No. PASOS	90 / 10	80 / 10
		CORROSIÓN PERMISIBLE	1	6
			3.2	3.2
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN				
ENVOLVENTE	SA-516 70	TUBOS	SA-179	EMPAQUES:
TAPA ENVOLVENTE	SA-516 70			LADO ENVOLVENTE
CANAL	SA-516 70			LADO TUBOS
TAPA CANAL	SA-516 70			CABEZAL FLOTANTE
TAPA CABEZAL FLOTANTE	SA-516 70			JUEGOS DE REPUESTO REQ.
ESPEJO	SA-516 70	FLOTANTE	SA-516 70	ANILLO DE PRUEBA REQ. (SI/NO)
DEFLECTORES: TRANSVERSALES	SA-516 70	LONG.	---	AISLAMIENTO: ENVOLVENTE
MATERIAL SOPORTE DE TUBOS	SA-516 70			CANAL DE ENTRADA / SALIDA
TIPO JUNTA DE EXPANSIÓN		MATERIAL JUNTA DE EXPANSIÓN		PLACA DE CHOQUE
NORMA DE DISEÑO	ET-090-PEMEX	CÓDIGO (4)	ASME VIII, DIV. 1	SA-516 70
PESOS APROX. / ENVOLVENTE	VACÍO	HAZ DE TUBOS	4,306	LLENO DE AGUA
				11,044 kg
NOTAS:				
(1) ESTE EQUIPO CUMPLE CON LOS CASOS DE OPERACION: INICIO Y FIN DE CORRIDA				
(2) INCLUYE 10% DE SOBREDISEÑO EN FLUJO Y CARGA TÉRMICA				
(3) EL DISEÑO POR SISMO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA CFE ED. 2015 Y EL DISEÑO POR VIENTO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DE LA CFE ED. 2008				
(4) SE REQUIERE ESTAMPADO ASME				
(5) DE ACUERDO A LA NORMA NOM-009-ENER-2014				
(6) SE REQUIERE COLOCAR EN LAS BOQUILLAS DE ENTRADA Y SALIDA LADO ENVOLVENTE Y LADO TUBOS:				
UNA CONEXIÓN DN 20, CLASE 6000, COPLÉ NPT, PARA MANÓMETRO				
UNA CONEXIÓN DN 25, CLASE 6000, COPLÉ NPT, PARA TERMÓMETRO				
(7) SE REQUIEREN CONEXIONES PARA VENTEO Y DREN EN LA TAPA DE LA ENVOLVENTE				
DN 20, CLASE 6000, COPLÉ NPT				
(8) LA PRESIÓN DE DISEÑO DEBERÁ SER LA MAYOR ENTRE LA PRESIÓN INDICADA Y LA PRESIÓN DE DISPARO DE LA BOMBA POR DESCARGA BLOQUEADA, EN LA INGENIERÍA DE DETALLE				
ESQUEMA				
				
POSICIÓN HORIZONTAL				
REVISIÓN	A	A1	B	0
EDICIÓN	PRE.	PRE.	APL. COMENTARIOS	APD
FECHA	Mar. 17, 2020	Abr. 10, 2020	Abr. 24, 2020	Mayo 27, 2020
ELABORÓ	ILE	ILE	ILE	ILE
REVISÓ	MCF	MCF	MCF	MCF
APROBÓ	FEO	FEO	FEO	FEO

		PTI-ID		HD-203-A-1021_0	HOJA No. 1 de 5
				HOJA DE DATOS CAMBIADORES DE CALOR TIPO: HAZ DE TUBOS Y ENVOLVENTE	PROYECTO: F.62635
"Actualización del Paquete de Diseño de Proceso para las Unidades Hidrotradoras de Naftas (HDN), en la Refinería en Dos Bocas, Paraíso, Tabasco"					
PLANTA	PLANTA HIDROTRADORA DE NAFTA, (U-61000)			CLAVE DE LA UNIDAD	EA-61013
LOCALIZACIÓN	REFINERÍA DOS BOCAS, PARAÍSO, TAB.		FABRICANTE	DTI REFERENCIA	
SERVICIO DE LA UNIDAD	ENFRIADOR CON AGUA DE NAFTA PESADA PRODUCTO			No. DE UNIDADES	UNA
TAMAÑO	1,168 x 6,096	mm	TIPO	AES	CONECTADO EN: PARALELO 1 SERIE 1
ÁREA (GR/EF) POR UNIDAD	505 / 493	m ²	No. ENV. / UNIDAD	1	ÁREA (GR/EF) POR ENVOLVENTE 505 / 493 m ²
CONDICIONES DE OPERACIÓN (1)					
		LADO ENVOLVENTE		LADO TUBOS	
		ENTRADA	SALIDA	ENTRADA	SALIDA
NOMBRE DEL FLUIDO		NAFTA PESADA		AGUA DE ENFRIAMIENTO	
CANTIDAD TOTAL DE FLUJO DE FLUIDO		199,484 x 1.1 (2)		291,818 x 1.1 (2)	
VAPOR					
LÍQUIDO		219,432	219,432		
VAPOR DE AGUA					
AGUA				321,000	321,000
NO CONDENSABLES (PESO MOLECULAR)					
TEMPERATURA		55.0	38.0	32.0	37.8
DENSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)		751.0	763.4	995.3	993.3
VISCOSIDAD (VAPOR / LÍQUIDO)		0.4300	0.5000	0.7645	0.6809
CALOR ESPECÍFICO (VAPOR / LÍQUIDO)		0.5000	0.4830	0.9986	0.9984
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (VAPOR / LÍQUIDO)		0.1030	0.1060	0.5316	0.5384
CALOR LATENTE ESPECÍFICO					
PRESIÓN DE ENTRADA (atm. 1.03 kg/cm ²)				11.5	6.0
VELOCIDAD				0.40	1.53
CAÍDA DE PRESIÓN (PERMISIBLE / CALCULADA)		0.70	0.16	0.70	0.65
RESISTENCIA DE ENSUCIAMIENTO				0.0004	0.0006
COEFICIENTE PROMEDIO DE PELÍCULA				1,221.5	6,162.0
CALOR INTERCAMBIADO				1.7 x 1.1 (2)	MTD (CORREGIDA) 8.6 °C
COEF. TOTAL DE TRANSF. DE CALOR (REQ. / CALC. / LIMPIO)		437.7			445.6 931.4
ρv ² (kg/(m s ²)): BOQUILLA DE ENTRADA ENVOLVENTE		2.133	ENTRADA A LA ENV.	1.615	SALIDA DE LA ENV. 815
CONSTRUCCIÓN POR ENVOLVENTE (3) (4)					
No. TUBOS	1384	D.E.	19.05	mm	BOQUILLAS: NUMERO - TAMAÑO - CLASE - CARA (6) (7)
ESPESOR	2.108	mm	MINIMO / PROMEDIO	MINIMO	LADO ENVOLVENTE LADO TUBOS
PASO	25.40	mm	ARREGLO TUBOS	90°	1 - D.N. 250-300 C.S.C.R. 1 - D.N. 250-150 C.S.C.R.
LONGITUD	6,096	mm	TIPO	LISO	Entrada Intermedia Salida
UNIÓN TUBO - ESPEJO	EXPANSIONADA CON DOS RANURAS			Salida	1 - D.N. 300-300 C.S.C.R. 1 - D.N. 250-150 C.S.C.R.
DIÁMETRO ENVOLVENTE (DI / DØ)	1,168 /	mm		Ventee	
TIPO DE DEFLECTOR TRANSVERSAL	SEGMENTADA (CORTE HORIZONTAL)			Dren	
SEPARACIÓN C/C	351.0	mm	No. DE PASOS CRUZADOS	15	P. alivio kg/cm ² g
% CORTE	18.3		PRESIÓN DE DISEÑO		18.6
TIPO SOPORTE DE TUBO	VACÍO			kg/cm ² a	VACÍO TOTAL @ 200 °C
TIPO SELLO DEFLECTOR LONG	TEMP. DE DISEÑO (MAX / MDMT)			°C	85 / 10 80 / 10
FAJA DE SELLO / NUMERO	No. PASOS				1 4
PLACA DE CHOQUE	SI		CORROSIÓN PERMISIBLE	mm	3.2 3.2
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN					
ENVOLVENTE	SA-516 70	TUBOS	SA-179	EMPAQUES:	
TAPA ENVOLVENTE	SA-516 70			LADO ENVOLVENTE	NO ASBESTO RECUBIERTO DE AC. SUAVE
CANAL	SA-516 70			LADO TUBOS	NO ASBESTO RECUBIERTO DE AC. SUAVE
TAPA CANAL	SA-516 70			CABEZAL FLOTANTE	NO ASBESTO RECUBIERTO DE AC. SUAVE
TAPA CABEZAL FLOTANTE	SA-516 70			JUEGOS DE REPUESTO REQ.	
ESPEJO	SA-516 70	FLOTANTE	SA-516 70	ANILLO DE PRUEBA REQ. (SI/NO)	
DEFLECTORES: TRANSVERSALES	SA-516 70	LONG.	---	PROTECCIÓN AL PERSONAL (5)	(mm)
MATERIAL SOPORTE DE TUBOS	SA-516 70			CANAL DE ENTRADA / SALIDA	(mm)
TIPO JUNTA DE EXPANSIÓN	MATERIAL JUNTA DE EXPANSIÓN			PLACA DE CHOQUE	SA-516 70
NORMA DE DISEÑO	ET-090-PEMEX	CÓDIGO (4)	ASME VIII, DIV. 1	CALC. MAWP (SI / NO)	SI CLASE TEMA R
PESOS APROX./ ENVOLVENTE	VACÍO	15,725	HAZ DE TUBOS	9,796	LLENO DE AGUA 22,890 kg
NOTAS:			ESQUEMA		
(1) CASO CRÍTICO: INICIO DE CORRIDA.					
(2) INCLUYE 10% DE SOBREDISEÑO EN FLUJO Y CARGA TÉRMICA					
(3) EL DISEÑO POR SISMO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE OBRAS CIVILES DE CFE ED. 2015 Y EL DISEÑO POR VIENTO DEBE REALIZARSE EN CONFORMIDAD CON EL MANUAL DE OBRAS CIVILES DE CFE, ED. 2008					
(4) SE REQUIERE ESTAMPADO ASME.					
(5) DE ACUERDO A LA NORMA NOM-009-ENER-2014					
(6) SE REQUIEREN CONEXIONES PARA VENTEO Y DREN EN LA TAPA DE LA ENVOLVENTE					
(7) DN 20, CLASE 6000, COPLÉ NPT					
(7) SE REQUIERE COLOCAR EN LAS BOQUILLAS DE ENTRADA Y SALIDA LADO ENVOLVENTE Y LADO TUBOS.					
UNA CONEXIÓN DN 20, CLASE 6000, COPLÉ NPT PARA MANÓMETRO					
UNA CONEXIÓN DN 25, CLASE 6000, COPLÉ NPT PARA TERMÓMETRO					
POSICIÓN HORIZONTAL					
REVISIÓN	A	B	0		
EDICIÓN	PRE.	APL. COMENTARIOS	APD		
FECHA	Mar. 17, 2020	Abr. 17, 2020	Mayo 27, 2020		
ELABORÓ	ILE	ILE	ILE		
REVISÓ	MCF	MCF	MCF		
APROBÓ	FEO	FEO	FEO		

Anexo 2. Hojas de datos para los intercambiadores de calor EA-61005 AB, EA-61006, EA-61008 AB, EA-61011 y EA-61013 de la planta hidrotradora de naftas Refinería Dos Bocas, Tabasco.


```
L=; rho=; M=; dP=; d=; D=d/12; e=; f1=; gc=, Error=0.00000001;
```

L es la longitud [ft], rho es la densidad [lb/ft³], M es la viscosidad [cP],
dP es el gradiente de presión [lb/ft²], d es el diámetro de la tubería [in],
D es el diámetro de la tubería [ft], e es el coeficiente de rugosidad de la tubería [ft]
f1 es un factor de fricción inicial propuesto [].

```
v=36; %Velocidad propuesta [ft/s]
q=3; %Flujo volumétrico propuesto [ft^3/s]
N=0; %Iteración 0
Z=1;
while abs(Z)>Error
Re=(22700*q*rho)/(d*M) %Número de Reynolds
```

Constantes para calcular el factor de fricción mediante la correlación
de Goudar-Sonnad:

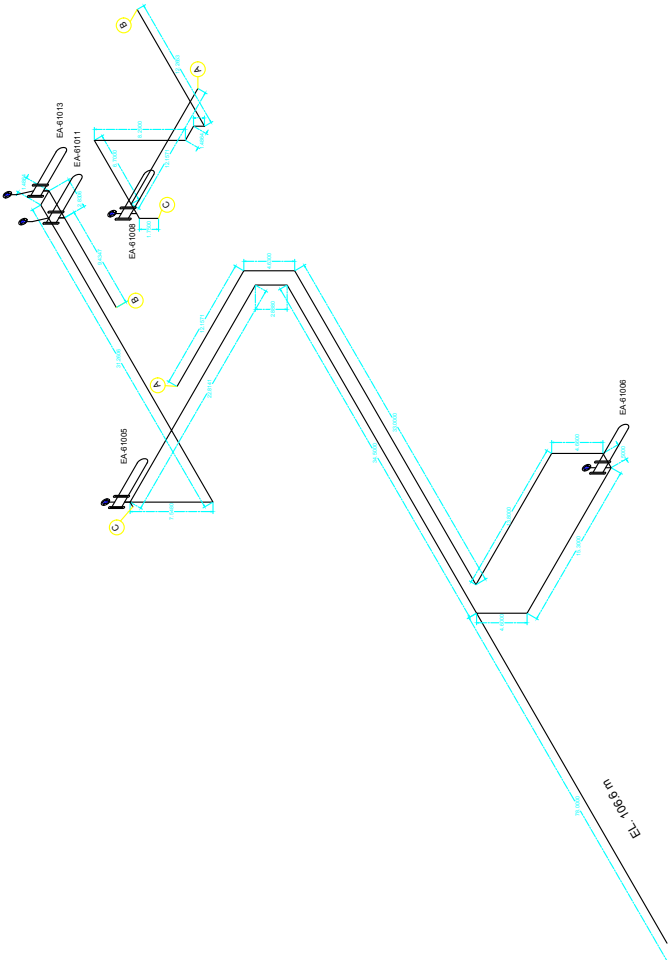
```
a=2/log(10);
b=e/(D*3.7);
r=(log(10)*Re)/5.02;
s=b*r+log(r);
w=s^(s/(s+1));
g=b*r+log(r/w);
z=log(w/g);
kh=(g*z)/(g+1);
k=kh*(1+(z/2)/((g+1)^2+(z/3)*(2*g-1)));
```

```
fi=(1/(a*log(r/w)+k))^2 %Factor de fricción
vi=((2*dP*D*gc)/(fi*L*rho))^(1/2) %Ecuación del momentum
qi=(vi*D^2*pi)/4; %Ecuación de continuidad
Z=(q-qi)/qi %Error calculado
q=qi %Flujo volumétrico calculado
N=N+1 %Número de iteración
```

Condición para limitar el número de iteraciones a 20:

```
if N==20  
"No Se Llegó A La Convergencia En El Número De Iteraciones Deseadas"  
break  
end  
end
```


Anexo 3. Plano isométrico de la red de tuberías para la planta hidrotratadora de naftas Refinería Dos Bocas, Tabasco.



Anexo 4. Algoritmo de cálculo para el diámetro de una tubería a partir de un ΔP máximo.