



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ESTUDIO DE REDES DE FLUJO DE FLUIDOS
MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS
COMPUTACIONALES**

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE REDES DE FLUJO DE FLUIDOS MEDIANTE EL USO DE
HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

**Trabajo especial de grado presentado como requisito para optar al
título de**

INGENIERO MECÁNICO

Autor:

Leventis C. Fotini E.

C.I.: 19.572.571

Tutor: Ing. Caraballo V. Gruber A.

San Diego, Octubre de 2017



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-M-066-2017-2

Valencia, 07 de Julio de 2017.

Ciudadano:
Fotini Elena Leventis
C.I. 19.572.571
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 2-2017 de fecha 07/07/2017 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado "ESTUDIO DE REDES DE FLUJO DE FLUIDOS MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES" presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Gruber Caraballo, C.I. 19.572.571 y la Ing. Alicia Pizzella, C.I. 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Ing. José Gregorio Díaz
Decano de la Facultad de Ingeniería



C. C. Control Interno (C. C. Control Interno y Facultad de Ingeniería)

JG.D/ir



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Gruber A. Caraballo V., portador(a) de la cédula de identidad N° V-12014408, hace constar que he leído el Proyecto del Trabajo de Grado, presentado por la ciudadano (a) Fotini Elena, Leventis Colmenarez, portador(a) de la cédula de identidad N° V-19.572.571, titulado **ESTUDIO DE REDES DE FLUJO DE FLUIDOS MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, y acepta la tutoría del mencionado Proyecto durante su etapa de desarrollo hasta su elaboración y evaluación; según las condiciones de la Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad José Antonio Páez y sus correspondientes Reglamentos.

En San Diego, a los 17 días del mes de octubre del año dos mil diecisiete

Firma

Nombre del Tutor: Gruber A. Caraballo V.

C.I. del Tutor: V-12014408

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
RESUMEN INFORMATIVO	XII
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema.	4
1.2 Formulación del problema.	6
1.3 Objetivos de la investigación.....	6
1.3.1 Objetivo general.	6
1.3.2 Objetivos específicos.....	6
1.4 Justificación.	6
1.5 Alcance.	7

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes.....	8
2.2 Base teórica.....	13
2.2.1 Redes de flujo de fluido en tuberías.....	13
2.2.2 Analisis de redes de flujo de fluido en tuberías	14
2.2.3 Ecuaciones de gobierno.....	14
2.2.3.1 Sistema de ecuaciones-Q.....	15
2.2.3.2 Sistema de ecuaciones-H.....	17
2.2.3.3 Sistema de ecuaciones-	

2.2.4.1 Método de Newton-Raphson	27
2.2.4.2 Método de Hardy Cross	29
2.2.5 Modelado de redes de flujo de fluidos	30
2.2.6 Herramientas computacionales para el modelado de redes.....	30
2.2.6.1 Pipe Flow Expert.....	31
2.2.6.2 AFT Fathom 9.....	32

III MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación.....	34
3.2 Diseño de la investigación	35
3.3 Nivel de la investigación	35
3.4 Población y muestra.....	36
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	37
3.6 Fases de la investigación	38

IV RESULTADOS

4.1 Identificación de los factores termoenergéticos.....	43
4.1.1 Ley de conservación de la masa y de la energía.....	44
4.1.2 Modelos de pérdida por fricción.....	44
4.2 Selección de las herramientas computacionales validadas	45
4.3 Selección de la red de flujo de fluidos a estudiar	45
4.4 Desarrollo de las simulaciones con las herramientas computacionales.....	48
4.4.1 Resultado de la simulación en Pipe Flow Expert	49
4.4.2 Resultado de la simulación en AFT Fathom 9.....	51
4.4.3 Análisis del resultado de las simulaciones.....	54
4.5 Evaluación de las simulaciones y caracterización de los criterios.....	55
4.5.1 Validación de los resultados	55
4.5.2 Comparación de los resultados obtenidos.....	56

4.5.2.1 Valores de salida.....	56
4.5.2.2 Requerimiento Computacional	58
4.5.2.3 Acceso y Adquisición del Software.....	59
4.5.3 Caracterización de la Red	61

V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones.....	65
5.2 Recomendaciones	67

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	69
----------------------------------------	-----------

ANEXOS.....	71
--------------------	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO		pág
FIGURA		
1	Redes de tuberías.....	13
2	Fragmento de dos lazos de una Red.....	20
3	Representación grafica del método Newton-Raphson.....	28
4	Interfaz de entrada al software Pipe Flow Expert.....	32
5	Interfaz de entrada al software AFT Fathom 9.....	33
6	Esquematación de la red de flujo a estudiar.....	47
7	Esquema de proceso utilizado en los programas computacionales	49
8	Resultado de Simulación realizada en Pipe Flow Expert.....	51
9	Resultado de simulación realizada en AFT Fathom 9.....	53

LISTADO DE TABLAS

CONTENIDO		pág.
TABLA		
1	Propiedades de la Red.....	46
2	Comportamiento de la Bomba.....	46
3	Caudales Obtenidos con Pipe Flow Expert.....	50
4	Función de cada Tanque.....	50
5	Caudales Obtenidos en Fathom 9.....	52
6	Resultado de los Programas y su Porcentaje de Error.....	56
7	Valores Básicos de la Base de Datos de los Programas.....	58
8	Requerimientos Computacionales de cada programa.....	58
9	Accesibilidad de los Programas.....	60
10	Variables de los Escenarios	62
11	Resultados de los Escenarios	62

REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE REDES DE FLUJO DE FLUIDOS MEDIANTE EL USO DE
HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES**

Autor: Leventis C. Fotini E.

Tutor: Caraballo V. Gruber A.

Fecha: octubre 2017

RESUMEN INFORMATIVO

La necesidad de avanzar con la tecnología al aumentar la calidad de vida conlleva a realizar estudios que fomenten progresos novedosos. Es por esto, que se ejecutó la presente investigación con el objetivo de estudiar las redes de flujo de fluidos por medio de herramientas computacionales, atendiendo al principio de funcionamiento de importantes recursos en diferentes disciplinas. Para ello, se asumió una investigación no experimental de tipo descriptivo correlacional. La misma abordó como población las redes de flujo de fluidos. Para llevar a cabo el estudio, se establecieron los criterios de estudio, se escogieron dos herramientas computacionales de modelado y análisis de redes de tuberías, las cuales son

. Igualmente, se seleccionó una red de tuberías compleja como muestra de la investigación para esquematizar y modelar en los softwares mencionados anteriormente y realizar la simulación de la red en los dos programas. De acuerdo con lo obtenido en las simulaciones se concluyó que ambos softwares presentan el análisis de redes desde un enfoque distinto permitiendo obtener resultados validados similares con poco margen de diferencia que presume no guardar relación alguna con la revisión teórica o las ecuaciones utilizadas y que en su lugar aparenta corresponder al método resolutivo de la red mediante el enfoque proporcionado a la misma por cada fabricante y su criterio. Así mismo, se analizó la interfaz de cada software donde se atribuye a AFT Fathom 9 un carácter más profesional, organizado y apto para fines investigativos por su presentación y cantidad de funciones extra que aportan precisión y facilidad de diseño. Por otro lado, Pipe Flow Expert resulta más adecuado para fines educativos por su sencillez y manejabilidad, combinado con una excelente accesibilidad.

Descriptor: Redes de flujo, fluidos, Simulación, pérdidas de energía, tuberías, Pipe Flow Expert, AFT Fathom 9.

INTRODUCCIÓN

Las redes de flujo de fluidos constituyen uno de los sistemas más importantes de la actualidad debido a sus numerosas aplicaciones de vital importancia para el desarrollo de la vida cotidiana. Los sistemas hidráulicos han reemplazado en mayor medida a los sistemas mecánicos debido a su mayor capacidad para generar potencia a un menor desgaste y consumo de energía. La continua necesidad de avanzar y de mejorar la eficiencia de estos sistemas hace que sea menester elevar a un nivel superior el estudio de los mismos con métodos innovadores que permitan predecir y entender su comportamiento para mejorar y facilitar el uso de los mismos llevando sistemas complejos a un nivel de mayor precisión de manera que puedan ser diseñados y evaluados de una forma más fácil, económica y segura.

Uno de los recursos más valiosos a la hora de automatizar y aprovechar la tecnología es el computador. Con los actuales avances en programas computacionales vemos la ventaja de poder simular el funcionamiento de sistemas y analizar de manera más rápida una red de flujo, cuyo funcionamiento por más sencillo que se presente, involucra una serie de variables con relaciones complejas que necesitan ser cuantificadas y desarrolladas por medio de modelos matemáticos aún más complejos, que de otra manera, sería necesario utilizar grandes recursos de laboratorio y tiempo que hacen del diseño y estudio de redes una tarea costosa y tardía.

Actualmente la ciencia y la tecnología computacional trabajan de la mano para mejorar estos recursos, y es por esto que la investigación científica juega un papel fundamental para el avance de la ingeniería. La investigación científica como tal, se concibe como un conjunto de procesos sistemáticos y empíricos que se aplican al estudio del sistema; es cambiante y evolutiva, lo cual obliga al investigador a permanecer en constante avance que conjuntamente deriva en la producción de nuevos conocimientos y en la resolución de problemas ya existentes que permiten que la humanidad avance y florezca mientras que el ingeniero a su vez obtiene cada vez más y mejores recursos que utilizar para el mismo fin. Esta es la razón que fomenta la

realización de este proyecto de investigación con referencia al estudio del comportamiento de redes de flujo de fluidos por medio de herramientas computacionales, orientándola a cumplir sus objetivos a través de la caracterización de una red y a obtener, mediante simulaciones, resultados que constituyan un aporte científico sustancial en la línea de investigación de termofluidos.

La investigación está titulada: Estudio de redes de flujo de fluidos mediante el uso de herramientas computacionales. En ella se desarrollaron los parámetros necesarios para lograr la obtención y análisis de las características esenciales de una red de flujo de fluidos, y como se mencionó anteriormente, requiere un desarrollo sistemático, lógico, y organizado que permita el flujo de la investigación.

El capítulo I, comprende la problemática a la cual se pretende dar una solución y los objetivos que se pretenden cumplir con el presente estudio. Además de presentar el problema, se pretende dar a conocer la importancia del trabajo y estudio del mismo y la repercusión que tendrá el cumplimiento de los objetivos que se pretenden alcanzar, así como también el alcance que tendrá la investigación.

En el capítulo II se presenta los resultados de la revisión de diversas fuentes, donde se presentan los antecedentes relacionados a la investigación tanto nacionales como internacionales y las bases teóricas que la fundamentan, arrojando como resultado la identificación de los factores termo-energéticos que influyen en el estudio de las redes de flujo de fluidos y los distintos métodos resolutivos junto con sus ecuaciones para el estudio analítico de las mismas.

El capítulo III corresponde a la descripción de las fases metodológicas, donde se presenta la secuencia lógica y sistemática que llevará la investigación, desarrollada con un diseño de investigación no experimental de tipo descriptivo correlacional que permita el correcto alcance de los objetivos. Como seguimiento de ese planteamiento, se introduce en el capítulo IV la comparecencia de los resultados obtenidos de las fases metodológicas presentadas, que pretenden formar las bases cuantificadas para el análisis apropiado que logre finalmente el cumplimiento de los objetivos.

Al comparar las evidencias presentadas en los capítulos anteriores se realiza una capitulación de cada fase y sus resultados que deriva en el capítulo V con las pertinentes conclusiones y recomendaciones del proceso investigativo. En este capítulo se aborda brevemente el cierre de cada uno de los procesos llevados a cabo y se presentan, según la experiencia obtenida por el investigador en carácter de propia práctica, los puntos que vale la pena recomendar para futuras investigaciones en la misma aplicación o parecida.

Finalmente, cierra la estructura el listado de las bibliografías consultadas y los anexos que se manejaron durante la investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Las redes de flujo han demostrado ser uno de los medios más importantes en el desarrollo de la humanidad y la tecnología, de estas se derivan grandes avances en el transcurso de la historia y sus aplicaciones han venido evolucionando a lo largo del tiempo hasta hacerse prácticamente indispensables. Las redes eléctricas, de fluidos, de transporte y de distribución en general son los usos más comunes e importantes que se les ha dado. Entre este mencionado grupo, las que han jugado uno de los papeles más relevantes son las redes de flujo de fluidos que, en general, son una serie de vías que conducen un fluido originándose en una fuente y terminando en un sumidero, de su aplicación dependerá el diseño de la red, sus componentes y accesorios. En la actualidad se hace presente su implementación en procesos presentes al día a día o que, en su defecto, contribuyen directamente en el mismo, como refiere a la construcción, la mecánica hidráulica, automotriz, biomecánica, refrigeración, termodinámica y todas las disciplinas que involucren fluidos en movimiento. Incluso, en los últimos tiempos los sistemas hidráulicos y neumáticos han sustituido considerablemente los sistemas mecánicos, los cuales se han visto mermados por la gran capacidad que tienen los fluidos de transmitir potencia con un menor desgaste y tamaño, contribuyendo con la mayor duración y, por lo tanto, mayor factibilidad económica de los sistemas que usen redes de flujo de fluidos.

Desde la perspectiva más general, se hace necesario el estudio y análisis a profundidad de dichas redes para así predecir su comportamiento y contribuir a la mejora de sus aplicaciones. Por su parte, los medios computacionales constituyen, dentro de este marco, las herramientas más útiles al hombre cuando de mejoras y avances se trata, ya que han contribuido a facilitar y acelerar los análisis en las principales vías de desarrollo donde la ingeniería ha sido una de las más favorecidas.

En los últimos tiempos se han desarrollado herramientas especializadas en el estudio y simulación de redes de flujos de fluidos basadas en ecuaciones y modelos matemáticos que se centran en la resolución de las formulaciones que surgen como resultado del análisis energético que supone el estudio de fluidos bajo el mando de las leyes básicas que rigen la mecánica de fluidos. Herramientas que en todo caso permiten que un programa sea capaz de resolver problemas de fluidos de una manera fácil y sencilla. Así como también resolver estas ecuaciones incluso en una red de flujo de fluidos compleja en un reducido periodo de tiempo, permitiendo así el diseño de una red o estudio de una ya existente de manera rápida y económica facilitando no solo el estudio de la hidráulica y la neumática como tal, sino también permitiendo sus aplicaciones de una manera más económica y su enseñanza de forma pedagógica e innovadora.

En este caso en particular se utilizarán dos herramientas computacionales de diseño y análisis de redes de flujo complejas que trabajan con caídas de presión y determinación de flujos para resolver problemas y realizar cálculos hidráulicos y simulaciones. Las herramientas a utilizar son Pipe Flow Expert y AFT Fathom 9. Estas herramientas, como se mencionó anteriormente, son capaces de resolver una red de flujo de fluidos analizando la caída de presión entre distintos puntos de la red, utilizando ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos como la conservación de la energía y de la masa y los modelos de pérdidas como el de Darcy y Hazen-Williams, Teorema de Bernoulli, entre otras, resolviendo las ecuaciones obtenidas con algoritmos matemáticos. A su vez, son de sencillo funcionamiento y permiten estudiar una red compleja cambiando componentes, fluidos, estructuras y valores con fácil y rápido recalcado de los resultados, lo que contribuye a corregir errores de una red existente o reducir el tiempo de diseño de una nueva red.

En virtud de sus funciones, las herramientas se utilizarán con la finalidad de estudiar redes de flujos de fluidos y simular su funcionamiento, pudiendo así obtener dos resultados a través de los cuales se logre llevar a cabo una caracterización del

comportamiento basado en semejanzas y diferencias, analizadas a partir de las simulaciones obtenidas con las herramientas computacionales utilizadas.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se comportan las redes de flujo de fluidos al ser estudiadas mediante el uso de diferentes herramientas computacionales validadas?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Estudiar las redes de flujos de fluidos mediante el uso de herramientas computacionales.

1.3.2 Objetivos específicos.

Identificar los fundamentos termo-energéticos para el estudio de redes de flujo de fluidos.

Seleccionar las herramientas computacionales validadas utilizadas en el área del análisis de redes de flujos de fluidos.

Desarrollar simulaciones con las herramientas computacionales basadas en las características y fundamentos de las redes estudiadas.

Evaluar las simulaciones y caracterizar los criterios de semejanza y diferencias entre ellas.

1.4 Justificación de la investigación.

Las redes de flujo de fluidos constituyen una de las tecnologías más utilizadas en el mundo. Éstas se encuentran presentes, básicamente, en cualquier disciplina y cada vez más se nota el aumento de sus aplicaciones. Es por esto que la hidrodinámica es una especialidad tan importante cuyo estudio permanece en constante avance. El solo hecho de automatizar el cálculo de problemas y prever el comportamiento de una red de flujos de fluidos justifica el estudio de las herramientas obtenidas para ese fin, no solo por el avance en el cálculo en sí, sino por el constante uso de estas redes, que conlleva cada vez un mayor grado de dificultad debido al uso de circuitos más complejos que motivan a investigadores a tratar de facilitar su

estudio. Con los avances de la tecnología el uso de las herramientas computacionales pretende el método más avanzado para ese fin. Sin embargo, no ha sido fácil llegar hasta lo que hoy en día se conoce, y se ha requerido de investigaciones como la presente a realizar para el constante estudio y desarrollo de las herramientas que permiten a su vez estudiar las redes.

En este orden de ideas, la presente investigación pretende contribuir no solo con el estudio de las redes de flujo de fluidos y su aplicación, sino también con las herramientas computacionales que servirán de apoyo para realizar dicho estudio. Se debe recordar que todo lo que contribuya con los avances tecnológicos es un gran aporte, ya que mientras más avance la tecnología, más sencilla será nuestra existencia.

1.5 Alcance.

Con la presente investigación se pretende estudiar redes de flujo de fluidos por medio de las herramientas computacionales Pipe Flow Expert y AFT Fathom 9 con la finalidad de analizar las teorías y fundamentos que en estas redes intervienen. Para este proceso se utilizarán los programas ya mencionados para obtener el resultado de solución de una misma red en cada uno de ellos y así poder realizar, mediante las simulaciones obtenidas, una caracterización del comportamiento de la red de flujo de fluidos estudiada.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Este apartado se refiere particularmente a los fundamentos de la investigación, derivándose de la literatura consultada, las cuales se constituyen en bases teóricas ya establecidas que presentan la relación con el objetivo de sustentar de forma lógica y coherente el estudio de las redes de flujos de fluidos mediante el uso de herramientas computacionales.

2.1 Antecedentes

Para fines investigativos del presente proyecto conviene destacar el trabajo realizado por Ssenozi, I. (2016), titulado **“Pérdidas de energía en sistemas hidráulicos de plantas de tratamiento de agua”**. Universidad de Lund, Suecia. El aludido trabajo de investigación se centra en solucionar un problema de abastecimiento de una planta de agua potable llamada Vombverket. El autor afirma que la capacidad de la planta resultó afectada por pérdidas de presión en la red de tuberías producto de una expansión significativa realizada a la planta en los años 90, luego de haber sido construida la misma en los 50, donde se sostuvo que la planta no fue optimizada para el nuevo diseño del proceso. En esta expansión se introdujeron pérdidas de presión sustanciales a través de válvulas, codos y otros componentes hidráulicos. Para cumplir el objetivo planteado, el autor indica que se presentó una alternativa de colocar una bomba para agregar la energía faltante para el correcto abastecimiento, lo cual requirió un análisis detallado del flujo y la locación de las pérdidas de energía. Este análisis sentó la base para otra alternativa que sería la modificación del sistema hidráulico que reduciría las pérdidas de presión y eliminaría la necesidad de una bomba.

Para ello, se tomó toda la información existente de la planta como la recolectada en el análisis y se hizo un esquema en un modelo simplificado, incluyendo los puntos de pérdidas más relevantes. Al utilizarse el programa Pipe Flow Expert, se pudo realizar un modelo hidráulico más detallado y con una

descripción más efectiva del sistema complejo. Finalmente, el modelo fue validado y calibrado utilizando para ello los datos de la planta, y así fue modificado para optimizar su rendimiento. La conclusión a la que llegó el autor, luego de realizar las comparaciones financieras, fue a la propuesta de modificaciones específicas que reducirían las disipaciones de energía al eliminar ciertos componentes específicos o modificando el sistema para acortarlo y reducir las pérdidas.

Al comparar estas evidencias se determinó que el estudio llevado a cabo por Ssenozi guarda especial relación con la presente investigación, ya que utiliza una de las herramientas computacionales que se utilizaran de apoyo, y el trabajo realizado por el autor permite verificar la función y utilidad de las mismas habiendo logrado reducir significativamente las pérdidas de presión y modificado de manera fácil y satisfactoria una red de flujo de fluidos compleja, sirviendo de apoyo al estudio de las redes de flujo de fluidos a realizar e inquiriendo en reducción de tiempo y dinero en el proceso.

Por otro lado, Casali, D. (2013), realizó un trabajo de investigación para la obtención de un Master de Ciencia en Ingeniería Mecánica titulado **“Cuantificación de la incertidumbre en sistemas de flujo en tuberías”** en el Politécnico di Milano, Italia. En esa investigación el autor afirma que el diseño de sistemas de tuberías se rige por estándares y prácticas comunes que, aunque se considere un sistema seguro no proporcionan un resultado real debido a fuentes de incertidumbre presente en los procesos. El autor se plantea como objetivo realizar un análisis cuantitativo de esas incertidumbres que podría derivar en diseños más eficientes y confiables de manera de entender mejor el desempeño del sistema con la finalidad de mejorar el mantenimiento en cada componente. Para realizar el objetivo, Casali lleva un estudio de dos diferentes escalas de flujo cuyos sistemas va a modelar y luego aplicar el método de confiabilidad, la metodología de modelado considera DNS y RSM comparando sus efectividades y calidad de resultados. Para el sistema de una fase utilizan Matlab, pero para garantizar los resultados del mismo se realiza el modelado también con un software comercial validado, esto para comparar las respuestas a

distintas entradas y validar el modelo analítico de Matlab. Teniendo diferentes condiciones de operación del sistema se obtiene una salida diferente y comparando la salida de Matlab con la del software comercial se podría verificar si el código es correcto o no, preciso o no. De la derivación analítica de las ecuaciones básicas se determinó que la lógica detrás de los dos programas es distinta, debido a que en el primero se pueden escoger las características del fluido y cualidades de sistema y calcula como un sistema o subsistema donde las especificaciones de la bomba son constantes, mientras en el software comercial la presión de los nodos o niveles de los tanques son dados como entrada y el flujo es calculado bajo el método de Hardy-Cross. Luego de haber realizado los códigos en Matlab y un circuito de banco de pruebas en el otro software se pudo crear distintos escenarios jugando con el circuito y condiciones de operación con lo que se logró realizar la validación para luego seguir con el sistema de dos fases modelado con el software OLGA de SPT Group y realizar un modelo de sustitución con SRSM y Kriging y así finalmente realizar las pruebas de confiabilidad. El autor, llegó a la conclusión de que las consideraciones de ingeniería productiva de donde y cuando dependen de las aproximaciones introducidas por los análisis probabilísticos y el modelado de sustitución, los cuales son considerados aceptables.

Este trabajo beneficia la investigación presente, ya que utiliza una herramienta computacional validada del tipo de las presentes a utilizar con el mismo método de solución y la utiliza para validar un código a crear en Matlab, en el proceso compara el código creado y las entradas y salidas tanto de Matlab con el software validado para finalmente calcular la confiabilidad del modelo la cual fue satisfactoria.

Así mismo, se ha revisado el aporte nacional de Córdoba B. & Suarez E. (2008), con su trabajo **“Evaluación hidráulica de la red de recolección de gas del campo Sipororo, ubicado en los límites del Estado Barinas.”**. Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela. En este proyecto se realizó una evaluación hidráulica a una red de recolección de gas en los límites del estado Barinas, con la finalidad de establecer las restricciones operacionales en la red. Una vez definidos los escenarios

de producción de los pozos, cuya información fue facilitada por la empresa encargada de la operación de la red; se realizaron las simulaciones de los escenarios actuales, y con los datos de los reportes del simulador se pudo validar la red de recolección para la producción independiente. Posteriormente se realizaron las simulaciones de los 8 escenarios propuestos y se evaluaron dos presiones (mínima y máxima) de llegada a la planta de tratamiento, con los resultados se calcularon las velocidades erosionales las cuales se compararon con las velocidades del fluido y junto a las caídas de presión se verificaron con las establecidas en la normativa PDVSA. Los resultados obtenidos indican la existencia de velocidades y caídas de presión en varios tramos de tuberías que se encuentran por encima de las máximas establecidas en la norma. Estas restricciones identificadas impiden el óptimo funcionamiento de la red de recolección, lo que implica que se deben modificar varias tuberías.

El trabajo de investigación realizado por los autores anteriormente mencionados, se relaciona directamente con el presente debido a que en ambos se pretende estudiar redes de flujo de fluidos mediante herramientas computacionales, en el caso anterior se trata de otra herramienta distinta, pero se demuestra una vez más la utilidad y ventaja de dichas herramientas para el diseño y optimización de redes de tuberías.

Igualmente, Jiménez C. & Molina Y. (2013), realizaron un trabajo de investigación titulado **“Análisis de procesos de combustión en motores de combustión interna a través de herramientas computacionales.”**. Venezuela, Valencia, Universidad de Carabobo. En dicho trabajo, los autores se plantean como objetivo analizar procesos de combustión en motores de combustión interna a través de herramientas computacionales. En este trabajo se desarrollan simulaciones de procesos de combustión a presión y volumen constante a través de tres herramientas computacionales seleccionadas de alta confiabilidad, las cuales simulan el proceso de combustión considerando el principio de equilibrio químico. Se analizan los ciclos de Otto, Diésel y Brayton con distintos combustibles, a distintas relaciones combustible-aire relativas, considerando 10 especies químicas presentes en los gases productos de

la combustión. Para cada uno de los combustibles analizados, las relaciones aire-combustible y los ciclos estudiados se obtuvieron los valores de las fracciones molares de las especies químicas presentes en los gases de escape, así como sus propiedades termodinámicas. Los resultados obtenidos a través de cada una de las herramientas utilizadas muestran alta precisión entre sí, con un error relativo menor a 0,3% y una alta correspondencia con los resultados obtenidos por investigadores que desarrollaron estudios previos en el área de la combustión considerando las mismas variables analizadas en esta investigación.

Llegando así, los investigadores, a la conclusión de que para cálculos sencillos un modelo que tome en consideración las especies que están en mayor proporción, a saber: CO₂, H₂O, CO, O₂ y H₂ aporta resultados bastante aproximados que permiten evaluar el desarrollo del proceso de combustión. Se elaboraron los manuales de usuario para las herramientas computacionales seleccionadas, los cuales son fundamentales para el analista que trabaja con dichas herramientas computacionales. Lo cual permite reducir el tiempo de adiestramiento para la utilización de estas. Además, los manuales abordan de forma detallada y específica las aplicaciones relacionadas con el área la combustión en motores de combustión interna.

La anterior revisión bibliográfica, a pesar de no tratarse de la misma disciplina de este caso de estudio, tiene objetivos estrechamente relacionados, por haber trabajado del mismo modo con tres herramientas computacionales validadas para analizar un fenómeno específico y compararlo por medio de simulaciones. Esto constituye un gran aporte a la presente investigación, ya que permite tener un soporte metodológico, el cual además cumple los objetivos con los resultados obtenidos, los cuales fueron satisfactorios y de gran aporte a su campo de estudio. Este aspecto viene referido al soporte principal del estudio. Ampliándose la descripción del problema, permitiendo integrar la teoría con la investigación y establecer sus interrelaciones, de manera coordinado, coherente de conceptos para abordan el problema.

2.2 Bases teóricas.

Este apartado refiere particularmente a fundamentar la investigación, derivándose de la literatura consultada y constituyéndose de las bases teóricas ya establecidas que presenten relación con el objetivo de estudio.

2.2.1 Redes de flujo en tuberías

Una red de tuberías es aquella que está compuesta por más de dos tramos. Mott, (2006) afirma: “Cuando un sistema de flujo en tuberías tiene tres ramas o más, se le denomina red. Las redes son indeterminadas porque hay más factores desconocidos que ecuaciones independientes” (p. 368). Las redes de tuberías pueden ser de lazos o ramas (Ver Fig. 1). En un sistema de ramas (Fig. 1a), por definición no existen lazos ya que el flujo no recircula y el número de nodos es siempre uno mayor al número de tuberías. En las redes de lazo (Fig.1b) el fluido si recircula y en este caso el número de nodos es menor al número de tuberías.

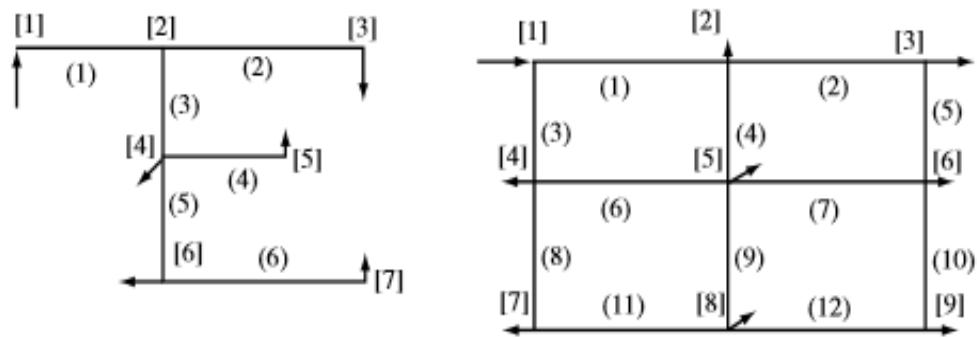


Figura 1: Redes de tubería, (a) Red de tuberías de ramas.

(b) Red de tuberías de lazo.

Fuente: Larock B. Jeppson R. & Watters G. (2000)

Hydraulics of Pipeline Systems

2.2.2 Análisis de redes de flujo de fluidos en tuberías

Para el análisis del flujo en redes, Larock, Jeppson y Watters, (2000) mencionan que:

Las ecuaciones desarrolladas del principio de continuidad serán llamadas $\Sigma C = 0$ y las basadas en el principio de conservación trabajo-energía serán llamadas $\Sigma H = 0$.

El número de estas ecuaciones que constituirán un sistema de ecuaciones no redundantes está relacionado directamente a relaciones fundamentales entre el número de tuberías, número de nodos y número de lazos independientes que tienen lugar en sistemas de tuberías de ramas y lazos. (p. 2)

2.2.3 Ecuaciones de gobierno

Principalmente, las ecuaciones que gobiernan las redes de tuberías, son las leyes básicas de la mecánica de fluidos, destacando Larock, (2000): Ley de conservación de masa y Ley de conservación de energía, incluyendo las ecuaciones de Darcy-Weisbach o Hazen-Williams para establecer la relación entre el caudal y las pérdidas de energía. Sobre las bases de las ideas expuestas, y para el posterior uso de las siguientes ecuaciones, la fórmula de pérdidas de carga será presentada en la forma que se observa en la Ec.1 y las leyes de conservación de masa y energía serán presentadas, como ya se mencionó en el apartado anterior, en función de las Ecuaciones de nodos y lazos.

Ec.1

Donde:

h_f : Pérdidas por fricción.

K : Factor de resistencia

Q : Caudal (

Del mismo modo, Larock, (2000), indican que se pueden desarrollar tres sistemas de ecuaciones diferentes para la solución de problemas de análisis de redes. Estos tres sistemas se denominan de acuerdo a las variables consideradas como principalmente desconocidas en cada método y mantienen su origen, igualmente, en base a las formulaciones realizadas de cada variable desconocida con referencia al balance energético. Partiendo de este marco, los sistemas de ecuaciones que se obtienen del estudio de redes son las (como su nombre lo indica, cuando el caudal en las tuberías es el principal desconocido), las (cuando las disponibilidades, H, son las principales desconocidas), y las Ecuaciones-

2.2.3.1 Sistema de ecuaciones-Q

Las evidencias anteriores afirman que el análisis de flujo en redes de tuberías está basado en las ecuaciones de conservación de masa y energía y que a partir de estas postulaciones se logra llevar a cabo las formulaciones que permitirán la resolución de la red. Partiendo entonces de la ley de continuidad, Larock, (2000) explican que para satisfacer la continuidad el caudal que entra a un nodo debe ser igual al que sale, por lo tanto:

Ec.2

Donde:

, = nodo

demanda del nodo (m³/s)

Caudal de cada tubería conectada al nodo (m³/s)

La ecuación anteriormente presentada (Ec. 2) constituye la primera parte de las Ecuaciones-Q. Para la continuación de la formulación parte de la formulación anterior y se complementa debido a que el principio de trabajo y energía proporciona

otras ecuaciones que deben ser satisfechas. Dichas ecuaciones se obtienen a partir de la suma de las pérdidas de carga para producir ecuaciones independientes. A continuación, se presenta, entonces, la ecuación de suma de pérdidas que servirá de base para formular la ecuación de pérdida de carga de cada tubería, las cuales son la segunda parte de las Ecuaciones-Q:

Ec.3

Expresando las pérdidas de cargas de la misma manera en que se expuso en la Ec. 1 se obtiene:

Ec.4

Al desarrollar la ecuación anterior debe tenerse en cuenta que la suma incluye todas las tuberías que forman el circuito. Luego de desarrollada la ecuación, si se obtiene que la dirección del flujo es contraria la dirección supuesta cuando se escribieron las ecuaciones y resulta negativo, entonces hay dos alternativas: Una es cambiar la ecuación corrigiendo la dirección de los flujos. La segunda, la cual es preferida a la hora de escribir un programa para resolver estas ecuaciones, es reescribirlas de esta manera:

Ec.5

En general esta manera suele utilizarse cuando no se tiene certeza del sentido del flujo, entonces se utiliza esta de una vez para no verse en la necesidad de reescribir luego de realizar cálculos ahorrando tiempo y evitando confusiones.

2.2.3.2 Sistema de ecuaciones-H

Según Larock, et al, (2000), si la altura o disponibilidad en una red son las principales variables desconocidas, entonces se debe desarrollar y resolver un sistema de Ecuaciones-H. Continuando con las bases expuestas en apartados anteriores, lo anterior ratifica que la formulaciones deben nombrarse y llevarse a cabo de acuerdo la variable desconocida que en este caso es H, a este efecto una ecuación es escrita para cada nodo presente en la red (o se resta uno si en la misma existen menos de dos fuentes de abastecimiento). Como las redes de lazo tienen menos nodos que tuberías, van a haber menos H-ecuaciones que Q-ecuaciones. No obstante, son menos ecuaciones, pero no lineales, mientras que las ecuaciones de continuidad en el sistema de Ecuaciones-Q son lineales facilitando la resolución de los sistemas de ecuaciones obtenidos de dicha formulación.

Volviendo la mirada a la formulación, para desarrollar un sistema de H-Ecuaciones se comienza despejando el caudal de la fórmula de pérdidas de la siguiente manera:

Ec.6

Al final, las pérdidas por fricción se han reemplazado por la diferencia en valores de disponibilidad entre los nodos de entrada y de salida. Además, en esta ecuación se introduce una nueva notación de subíndices que indica que los valores van desde un nodo hasta el otro. Q_{ij} = Caudal que va desde el nodo i hasta el nodo j.

K_{ij} = coeficiente de pérdida para la tubería desde hasta . Es decir, que el primer subíndice indica el nodo donde comienza el tramo y el segundo subíndice el nodo donde finaliza, determinando, por consiguiente, la dirección tomada en el estudio.

Una forma alternativa de escribir la ecuación es:

Ec.7

Donde:

número de tubería

Sustituyendo la Ec. 7 En la ecuación de continuidad de nodos (Ec. 2) Se logra obtener:

$$\frac{Q_1}{A_1} + \frac{Q_2}{A_2} + \dots + \frac{Q_n}{A_n} = 0$$

Ec.8

Donde:

Las sumas están sobre todas las tuberías que van hacia y forman j, respectivamente.

Si se desea automatizar la selección de signos puede escribirse de la siguiente manera:

$$\sum_{j \in J_{in}} \frac{Q_j}{A_j} - \sum_{j \in J_{out}} \frac{Q_j}{A_j} = 0$$

Ec.9

2.2.3.3 Sistema de ecuaciones-

En relación con las formulaciones anteriores, Larock, et al, (2000), indican que el número de Ecuaciones- , la formulación actual, es normalmente alrededor de la mitad del número de para una red. Esta reducción en el número de ecuaciones no es necesariamente una ventaja, ya que todas las ecuaciones son no lineales y pueden contener muchos términos, incurriendo entonces en mayor complejidad de las ecuaciones resultantes que a su vez dificulta en gran manera la resolución del sistema obtenido. Continuando con las afirmaciones anteriores estas ecuaciones consideran, como su nombre lo indica, los caudales correctivos de un lazo 's como las principales variables desconocidas. Estos caudales correctivos o 's serán determinados a partir de las ecuaciones de energía escritas para el número total de lazos en la red, entonces se debe desarrollar el mismo número de ecuaciones de caudales correctivos que de lazos. Para obtener esas ecuaciones, se debe reemplazar el caudal en cada tubería de la red por un caudal inicial, denotado como , más la suma de todos los caudales correctivos inicialmente desconocidos que circulan por la tubería :

Ec.10

Donde:

Cada suma incluye todos los caudales correctivos que pasan por la tubería .

Los caudales iniciales deben satisfacer las ecuaciones de continuidad de nodos, lo cual no es difícil. Aunque, por lo general no satisfarán las ecuaciones de energía escritas alrededor de los lazos de la red. La Ec. 10 se basa en el hecho de que cualquier ajuste puede hacerse al flujo asumido al principio sin violar la continuidad

de los nodos. Entender la importancia de este hecho ayuda a observar que cualquier entrado a un nodo mientras fluye por un lazo debe de igual manera salir de ese mismo nodo y viceversa (Ver Fig. 2). Debido a esto se decide establecer las ecuaciones de energía alrededor de los lazos de la red, donde será usado como caudal el caudal inicial más la suma de los corregidos. La continuidad de los nodos es satisfecha por el caudal inicial.

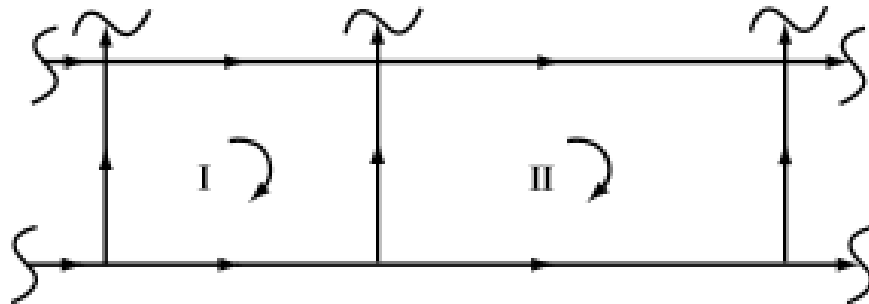


Figura 2: Fragmento de dos lazos de una Red.

Fuente: Larock B. Jeppson R. & Watters G. (2000)

Hydraulics of Pipeline Systems

Para resumir como se obtienen las ecuaciones, se deben sustituir los Q 's en la ecuación de energía de los lazos Ec. 3,

Ec.11

La suma incluye todos los caudales correctivos en la tubería i , y el signo más es usado si el caudal correctivo y el flujo están en la misma dirección, por el contrario, se usaría el signo menos antes de la suma.

Entonces la Ec. 3 se convierten en:

Ec.12

Para automatizar la selección de signos, la ecuación anterior puede ser escrita de la siguiente manera:

Ec.13

2.2.3.4 Soluciones basadas en la ecuación de Darcy-Weisbach

Según Larock, (2000), la Ecuación de Darcy-Weisbach (Ver Ec. 14 y 15) es utilizada para describir las pérdidas de cabeza como función del caudal en una tubería.

— —

Ec.14

— — — —

Ec.15

Donde:

= pérdida por fricción

= factor de fricción (función del número de Reynolds y la rugosidad relativa)

A= Área de la tubería

Por lo general todos los flujos de agua se encuentran en la zona de transición del diagrama de Moody, lo que implica que para este fin se puede utilizar la Ecuación implícita de Colebrook-White (Ec. 16 y 17) para definir y determinar el factor de fricción, la ecuación de presenta en la siguiente forma:

$$\frac{1}{f} = -2 \log_{10} \left[\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{0.29}{Re} \right] \quad \text{Ec.16}$$

$$\frac{1}{f} = -2 \log_{10} \left[\frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{0.29}{Re} \right] \quad \text{Ec.17}$$

Donde:

f = Factor de fricción

Re = Número de Reynolds

Como la ecuación (Ec. 16) se fusiona en la ecuación que describe la zona total de rugosidad en el diagrama de Moody y en la ecuación que describe el flujo hidráulicamente liso, se utilizara solamente cuando el flujo que presente la tubería sea un flujo turbulento. Si, por otro lado, el flujo presente resulta ser laminar (Número de Reynolds inferior a 2100) entonces se reemplazan las ecuaciones 16 y 17 por las siguientes:

$$\text{---} \qquad \qquad \qquad \text{Ec.18}$$

$$\text{-----} \qquad \qquad \qquad \text{Ec.19}$$

$$\text{---} \qquad \qquad \qquad \text{Ec.20}$$

Para resolver un problema básico que busca determinar el diámetro requiere que la ecuación de Darcy-Weisbach (Ec. 14) y la ecuación de Colebrook-White (Ec. 16) sean resueltas simultáneamente para D y f desconocidos. Muchos métodos se pueden usar para resolver estas ecuaciones los cuales, por lo general, son implementados por programas computacionales. Uno de los métodos utiliza el método de Newton para resolver simultáneamente la ecuación de Darcy-Weisbach y la ecuación de Colebrook-White para D y f desconocidos. Resolviendo las ecuaciones simultáneamente por el método de Newton, primero se debe reescribir las ecuaciones originales la forma genérica F(D,f). Una de las formas de reescribirlas es:

$$\text{---} \qquad \qquad \qquad \text{Ec.21}$$

$$\text{-----} \qquad \qquad \qquad \text{Ec.22}$$

La matriz Jacobiana para este sistema de ecuaciones es la matriz cuadrada de 2×2 , la cual es resuelta con el método de Newton-Raphson.

$$\begin{matrix} \text{---} & \text{---} \\ \text{---} & \text{---} \end{matrix} \qquad \text{Ec.23}$$

La convergencia que existe de la fórmula de Colebrook-White utilizando la iteración de Gauss-Seidel es la base para otra alternativa de solución simultánea de las ecuaciones. Donde se empieza dando algún valor razonable a λ , la ecuación 10 debe ser resuelta unas pocas veces usando siempre el último valor calculado de λ para recalcular λ . Se utiliza entonces el método Gauss-Seidel para resolver la ecuación 16, entonces la ecuación 14 puede resolverse con el método de Newton-Raphson con λ como conocido en cada iteración del método Newton. En este proceso el método Newton es, entonces, utilizado para resolver una sola ecuación para D desconocido. Como D afecta a λ , la iteración de Gauss-Seidel se debe repetir con cada nueva iteración de Newton. Por lo tanto, esta alternativa consiste en aplicar el método Newton para resolver la ecuación 14 para D , y con esta iteración se utiliza la iteración de Gauss-Seidel para resolver la ecuación 16 para λ . La iteración de Newton puede conseguirse con la siguiente ecuación

$$\text{-----} \qquad \text{Ec.24}$$

En la cual, $F(D)$, bajo la suposición de que f es conocida, es la ecuación 15 escrita de la siguiente forma:

$$\frac{h_f}{L} = \frac{1.49^2 Q^{1.49}}{C^{1.49} R^{4.75} S} \quad \text{Ec.25}$$

2.2.3.5 Solución basada en la ecuación de Hazen-Williams

La ecuación empírica de Hazen-Williams es usada ampliamente en la práctica para definir la relación entre la descarga y pérdida de cabezal para flujos de agua en tuberías. Para Larock, (2000) la ecuación de Hazen-Williams es

$$Q = 0.491 C R^{1.49} S^{0.54} \quad \text{Ec.26}$$

Donde:

C : 1.318 para el sistema ingles de unidades y 0.849 para el internacional

f : es el coeficiente de fricción de Hazen-Williams

R : radio hidráulico

S : pendiente de la línea piezométrica

El coeficiente de Hazen-Williams puede variar entre 150 para tuberías de paredes lisas, hasta un nivel más bajo de 80 para tuberías viejas y corroídas de hierro fundido. Otra forma de escribir la ecuación de Hazen-Williams es

_____ **Ec.27**

Donde:

$K_1 = 4.727$ con el Sistema Ingles y 10.7 en el Internacional.

Si se requiere resolver directamente para el diámetro de la tubería, entonces aparece como:

_____ **Ec.28**

_____ **Ec.29**

Donde:

$K_2 = 1.376$ (ES) ó 1.626 en (SI)

Como en la ecuación 28 indica, el uso de la ecuación de Hazen-Williams, permite encontrar el diámetro de la tubería directamente si el caudal Q , las pérdidas h_f , longitud L , y coeficiente de fricción CHW se conocen. Esta obvia ventaja y simplicidad computacional es la principal razón para su popularidad. Cuando se usan los programas computacionales, la facilidad de uso es de menor importancia comparada con la validez de la fórmula para un largo rango de condiciones de flujo. La ecuación de Hazen-Williams concuerda con los resultados producidos por la ecuación de Darcy-Weisbach para un flujo de agua en una tubería con paredes relativamente lisas con un rango del Número de Reynolds entre (rango típico para diseño de tuberías). De otra manera, no concuerda muy bien con los

resultados obtenidos de la ecuación de Darcy-Weisbach para un rango de condiciones de flujo en tuberías de paredes rugosas. De hecho, la ecuación de Manning es una ecuación empírica para la representación del flujo en tuberías con paredes rugosas, especialmente si la tubería no fluye completamente.

2.2.4 Método de solución

2.2.4.1 Método de Newton-Raphson

Comúnmente llamado método de Newton, es un método iterativo para la resolución de ecuaciones no lineales, a la solución de estas ecuaciones se les llama raíces. Este método se puede decir que es el más utilizado, ya que permite conseguir raíces complejas además de ser rápido.

El método de Newton-Raphson se puede derivar de la base de esta interpretación geométrica (Ver Fig. 3) o de un método alternativo basado en la serie de Taylor. Como en la Fig.3, la primera derivada en x es equivalente a la pendiente:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y - y_0}{x - x_0} \tag{Ec.30}$$

La cual se puede reordenar para obtener

$$y - y_0 = (x - x_0) \frac{dy}{dx} \tag{Ec.31}$$

La fórmula presentada anteriormente en la Ecuación 31 es llamada

(Chapra & Canale, 2010, p. 149). El método presente puede ser utilizado para resolver las ecuaciones de las Redes de tuberías ya que es especial para ecuaciones no lineales complejas. Larock, (2000) Afirman que la fórmula iterativa de Newton para resolver un sistema de ecuaciones puede escribirse como:

2.2.4.2 Método de Hardy Cross

El método de Hardy Cross es un método iterativo de aproximaciones sucesivas. Muy utilizado por su sencillo funcionamiento. Cross H., (1936) Propone dos métodos de análisis. En uno los flujos en las tuberías o conductores de la red siempre satisfacen la condición de que el flujo total que entra y sale de cada nodo es cero. En el otro método el cambio total de altura alrededor de cada circuito siempre es igual a cero. Dicho esto, Mott R. (2006) estableció un procedimiento para la resolución de redes de tuberías con el método de Hardy Cross de la siguiente manera:

Expresar la pérdida de energía en cada tubería, como

Ec.33

Suponer un valor para el flujo volumétrico en cada tubería de modo que el flujo que entra sea igual al que sale

Dividir la red en series de circuitos cerrados

Para cada tubería calcular la pérdida de carga (Ec. 33), con el uso del valor supuesto de Q

Proceder alrededor de cada circuito para sumar algebraicamente todos los valores de h . La suma resultante se denota con h

Para cada tubería calcular $2kQ$

Sumar todos los valores de $2kQ$, con la suposición que todos son positivos

Para cada circuito, calcular el valor de ΔQ , con

Ec.34

Para cada tubería calcular una estimación nueva de Q por medio de

Ec.35

Repetir los pasos hasta que ΔQ sea insignificante.

2.2.5 Modelado de redes de flujo de fluidos

El primer paso para el modelado de redes de tuberías complejas deberá ser la esquematización, ya que ayudará a especificar los aspectos y componentes más importantes a considerar durante el análisis. Durante la esquematización se deberá tener en cuenta que no todas las conexiones son representadas como nodos distintos, en vez deben combinarse o sumarse algunas como un solo nodo, también debe considerarse y presentarse solo las mayores y más viables distribuciones del sistema, y por último tener en cuenta que solo los componentes mayores con un impacto significativo en el sistema deben ser considerados (Larock, , 2000).

Atendiendo a las consideraciones anteriores, en el presente proyecto investigativo se llevará a cabo el modelado de redes de flujo de fluido utilizando herramientas computacionales validadas y disponibles comercialmente diseñadas para dicho fin, el posterior análisis de la red se realizará a través de las mismas herramientas por medio de simulaciones que las mismas realizan de la interacción del fluido con cada uno de sus componentes. Al momento de modelar deben tenerse en cuenta cada uno de los componentes que conforman la red y sus características, así como también las características principales del fluido a utilizar para realizar una esquematización lo más exacta posible siempre atendiendo a las consideraciones citadas en el párrafo anterior.

2.2.6 Herramientas computacionales para el modelado de redes

Extenso número de herramientas computacionales existe hoy en día para fines de estudio de la mecánica de fluidos, con objeto de llevar a cabo el presente caso de investigación se utilizarán softwares especializados para el modelado y análisis de redes de flujo de fluidos utilizados comúnmente en el ámbito comercial, en general los seleccionados se rigen bajo el mismo principio de operación para poder comparar resultados basados en los mismos criterios. Estos softwares se enfocan en el cálculo de la caída de presión en los nodos y en general del sistema, para ello varía cada uno en el método utilizado siendo los más comunes los cálculos de pérdidas por fricción de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, entre otros. Para el análisis energético de cada

nodo y del sistema en general ambos aplican las leyes de continuidad, como ya se registró en la revisión bibliográfica, representando las pérdidas energéticas con los modelos de fricción ya mencionados y solucionando el conjunto de ecuaciones no lineales obtenidas mediante métodos matemáticos iterativos como son el de Newton y Hardy Cross.

2.2.6.1 Pipe Flow Expert

Pipe Flow Expert (Fig. 4) es un software de la casa matriz Pipe Flow diseñado para el sistema operativo Windows utilizado para diseñar, documentar y resolver redes de tubería. Ayuda a resolver una amplia gama de problemas donde el flujo y las pérdidas de presión deben ser determinados. Puede modelar sistemas abiertos y cerrados y con múltiples tanques de alimentación y puntos de descarga, así como también pueden incluirse accesorios, válvulas de control y bombas.

En el modelado analiza y diseña para costos y energías eficientes obteniendo respuestas instantáneas y confiables. Esta confiabilidad se basa en sus robustos cálculos de las ecuaciones que gobiernan los sistemas utilizando el método de Darcy-Weisbach y factores de fricción de Colebrook-White y aplicando los métodos de resolución de ecuaciones de Newton. Finalmente, el programa realiza un chequeo de validación de los resultados obtenidos para verificar que las pérdidas de presión en cada tubería para el flujo calculado es la misma que la diferencia de presión calculada en el nodo de entrada y salida de una tubería, esto permite concretar que los resultados obtenidos fueron correctamente calculados.



Figura 4: Interfaz de entrada al software Pipe Flow Expert

Fuente: Pipe Flow Software (2017)

2.2.6.2 AFT Fathom 9

Este es un software de la casa matriz AFT (Applied Flow Technology) dedicada a la creación de productos y servicios en el área de los Fluidos. El Fathom (Fig. 5) es un software de análisis y modelado de flujo incompresible con simulaciones dinámicas del fluido que calcula las pérdidas de presión del sistema y su distribución de flujo, es de hacer notar que para el modelado se debe proporcionar la presión de entrada del sistema o en su defecto el flujo, pero no pueden presentarse estas dos variables como incógnitas ya que la red no podría ser resuelta. En adición a lo mencionado, el software tiene un amplio rango de modelado para componentes de sistemas tanto para diseño como para casos operacionales. Utiliza para calcular la fricción de las tuberías el método de Hazen-Williams, Ecuación de Bernoulli y

relaciones basadas en el Número de Reynolds, teniendo capacidad para realizar cálculos para fluidos no Newtonianos. Además, como método de solución de las ecuaciones básicas de los sistemas de flujo en tuberías utiliza el método de matriz de iteración de Newton-Raphson combinado con la eliminación Gaussiana y de métodos iterativos desarrollados por la misma casa matriz y que fueron validados para la seguridad y confiabilidad de los resultados.



Figura 5: Interfaz de entrada al software AFT Fathom 9

Fuente: AFT Fathom Software (2017)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología es una teoría de la investigación científica. Según Pardina (1982) “es el estudio crítico del método”. Desde el punto de vista semántico, el término significa tratado del método. Como tal se entiende una guía procedimental, producto de la reflexión, que provee pautas lógicas generales pertinentes para desarrollar y coordinar operaciones destinadas a la consecución de objetivos intelectuales o materiales del modo más eficaz posible.

3.1 Tipo de investigación.

El estudio de redes de flujo de fluidos por medio de herramientas computacionales se puede considerar una investigación de tipo descriptivo correlacional de acuerdo a los objetivos planteados y la manera a proceder para lograr dichos objetivos. Según Borja (2012), estos estudios “investigan y determinan las propiedades y características más representativas de los objetos de estudio como personas, viviendas, concreto armado, probetas o cualquier otro fenómeno que se quiera estudiar” (p. 3). Precisamente eso es lo que se pretendió, evaluar el comportamiento del fenómeno que representa una red de flujo de fluidos para realizar la caracterización de la misma, por lo tanto, concuerda con el tipo descriptivo.

La manera que se escogió para realizar lo anteriormente descrito, fue desarrollar simulaciones en programas distintos para comparar sus resultados analizando la relación entre las variables de entrada y salida y los valores y datos obtenidos de cada simulación, lo cual concuerda con la definición de Borja (2012), el cual afirma que “una investigación correlacional es aquella en que se analiza la relación entre ciertos sucesos, proporcionando indicios de la relación que podría existir entre dos o más cosas, o de que también uno o más datos podrían predecir un resultado específico”

(p.3). Las afirmaciones anteriores confirman también el carácter correlacional del estudio de los dos softwares al pretender correlacionar los aspectos principales de uno con el otro, así como también la relación interna de las variables de la red a estudiar donde mediante la caracterización se evalúa la relación que guarda una variable con la otra y como la configuración de dichas variables y las características de las mismas podría predecir un comportamiento específico.

3.2 Diseño de la investigación.

El diseño de investigación, lo define Stracuzzi (2003) como la estrategia que adopta el investigador para responder al problema, dificultad o inconveniente planteado en el estudio. Para fines didácticos, se clasifican en diseño experimental, diseño no experimental y diseño bibliográfico. De acuerdo a las afirmaciones anteriores y a lo planteado en esta investigación, el diseño de la misma fue no experimental, porque se caracterizó, modeló, se evaluaron los resultados y analizaron los mismos sin alterar directamente ninguna variable de manera física, las alteraciones que se realizaron a las variables y características iniciales de la red se llevaron a cabo mediante los softwares disponibles sin haber manipulado en ningún momento un banco de datos o red físicamente existente.

3.3 Nivel de la investigación.

Arias (1997), plantea, que el nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno. El tipo de investigación a realizar determina los niveles que es preciso desarrollar teniendo en cuenta que en una misma investigación es posible desarrollar uno o más niveles. Esta investigación comprendió los siguientes niveles:

Nivel Descriptivo: Arias (ob. cit.), señala que este nivel de investigación consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno o grupo con el fin de establecer su estructura o comportamiento; mide de forma independiente las variables. De acuerdo a esto, se caracterizó una red de flujo de fluidos con el fin de conocer su comportamiento describiendo en el proceso los parámetros, características y funcionamiento de la misma.

Nivel Correlacional: Hernández-Sampieri, Fernández y Baptista (2014), definen que este nivel pretende conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más variables, conceptos o categorías en una muestra o contexto en particular. En ocasiones solo se analiza la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio vínculos entre tres, cuatro o más variables. De acuerdo con esto, en el presente estudio se vinculan y asocian las variables presentes en la muestra que es, en este caso, la red a estudiar, mediante los resultados de las simulaciones incurriendo, durante la caracterización, en la comparación inevitable de un programa contra otro y establecimiento del grado de relación que guarda una variable con la otra dentro de la red.

3.4 Población y muestra

La población, se refiere al elemento o conjunto de elementos objeto del estudio, sobre el cual se centrará la investigación, para Hernández-Sampieri, (2014) “es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones”. Por otro lado, se puede decir que la muestra es la porción de la población que se utilizara para representar la misma y realizar el estudio, así mismo Hernández, Fernández y Baptista (ob. cit.), indican que la muestra “es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos, y que tiene que definirse y delimitarse de antemano con precisión, además de que debe ser representativo de la población.” El investigador pretende que los resultados encontrados en la muestra se generalicen o extrapolen a la población. El interés es que la muestra sea estadísticamente representativa.

En el caso de esta investigación, se estudiaron las redes de flujo de fluidos para a través de simulaciones realizadas, observar su comportamiento y caracterizar las mismas, por lo tanto, se puede decir que la población refiere a las redes de flujo de fluidos en general, mientras que la muestra será la red seleccionada para realizar dicho estudio y sobre la cual específicamente se va a trabajar, teniendo en cuenta que dicha red represente de manera satisfactoria su población general.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Luego de seleccionar la muestra a estudiar, la siguiente etapa consiste en recolectar los datos pertinentes sobre los atributos, conceptos o variables de las unidades de muestreo/análisis o casos (participantes, grupos, fenómenos, procesos, organizaciones, etcétera). Recolectar los datos implica elaborar un plan detallado de procedimientos que conduzcan a reunir datos con un propósito específico (Hernández-Sampieri, 2014). Con la finalidad de recolectar datos de una gran variedad de instrumentos o técnicas, tanto cuantitativas como cualitativas, es por ello que en un mismo estudio puede utilizar ambos tipos.

Partiendo de los aspectos anteriores se identifican los aspectos a tener en cuenta para la recolección de datos y a partir de ellos se abordan los recursos pertinentes. El primer recurso utilizado fue la revisión bibliográfica, que permitió obtener los datos necesarios sobre el proceso, las leyes y ecuaciones que gobiernan el comportamiento de una red de flujo de fluidos y que contribuyen de manera directa con su resolución, por lo tanto, la primera técnica de recolección de datos será la revisión documental. En esta técnica se utilizaron como fuentes las bibliografías más destacadas en el área de la mecánica de fluidos y de métodos numéricos para los conceptos básicos y de hidráulica de tuberías para la metodología de análisis, así como también trabajos de investigación certificados y artículos científicos para la recolección de fundamentación teórica necesaria de la mano de investigadores en el área y los manuales de usuario y documentación disponible de las casas matrices de los programas computacionales a utilizar.

Otra forma de contribuir con la recolección de datos fue optar por una segunda técnica implementable como lo fue la observación, Hernández, Fernández y Baptista (ob. cit.), afirman que el método de la observación, es un método de recolección de datos que consiste en el registro sistemático, válido y confiable de comportamientos y situaciones observables, a través de un conjunto de categorías y subcategorías, por medio del cual se obtuvieron datos de la red de tuberías a analizar con su comportamiento y de otras redes y sistemas relacionados con componentes y

subsistemas que ayudaran a cumplir los objetivos planteados, es preciso acotar el hecho de que mediante la observación se obtienen los datos de manera directa y serán tan confiables como así lo permita el observador dentro de sus posibilidades.

Finalmente, el tercer método para la obtención de datos utilizado fueron los instrumentos para recolectar los datos necesarios en la caracterización de la red. En este apartado se utilizaron dos herramientas computacionales validadas para modelar la red a estudiar y generar simulaciones que permitieran obtener los datos de resultado del funcionamiento de la red y así poder realizar una buena caracterización. Estas fueron: *EPANET*, las cuales son programas de modelado y análisis de redes de tuberías de fluidos que trabajan con las caídas de presión del sistema para determinar datos importantes como caudales, disponibilidades o en tal caso dimensionar y modelar una red de manera correcta y analizar errores en una red ya existente.

3.6 Fases de la investigación

Rodríguez (2003), describe que los procedimientos a seguir para el logro de los objetivos planteados se pueden organizar en fases o etapas, lo que permitirá el procesamiento de los datos en forma organizada. En virtud de llevar a cabo una investigación organizada que permitiera cumplir con cada objetivo planteado de manera sistemática fue necesario realizar las siguientes fases:

Fase I: Identificación de los factores termo-energéticos que intervienen en el estudio de redes de flujo de fluidos

Para cumplir con lo establecido, fue necesario realizar una revisión bibliográfica partiendo del contexto del objeto de estudio, con la finalidad de estructurar un marco teórico que permitiera sustentar y fundamentar la investigación a realizar, así como también identificar y conocer los fundamentos y ecuaciones que gobiernan las redes de flujo de fluidos y que influyen en su comportamiento, como son las leyes de conservación y otras afines.

Igualmente, para contribuir con esta fase fue necesario recurrir a fuentes bibliográficas, publicaciones de grupos de investigación universitarios y científicos,

fuentes verificadas digitales, trabajos de investigación certificados, entre otras para consultar y recopilar información de investigadores de primera línea que permitiera establecer y organizar la base teórica con el fin de comprender como funciona el objeto de estudio y realizar el análisis de una manera más sistemática y provechosa. En esta fase de la investigación fue necesario también revisar los antecedentes y trabajos realizados para el análisis de las diferentes experiencias de investigadores en el área de fluidos y para certificar la validez y originalidad de trabajo.

Fase II: Selección de las herramientas computacionales validadas en el área del análisis de redes de flujo de fluidos.

Para la realización de esta fase fue necesario realizar una revisión de programas computacionales de análisis de redes de flujos de fluidos, para así escoger dos que trabajen con los mismos criterios y proporcionen la misma salida para poder realizar la caracterización de una misma red desde dos puntos de vista distintos. En el proceso se utilizó un método de selección basado en ponderación de criterios donde se establecieron ciertos parámetros necesarios a presentar por los programas y cada uno fue evaluado de acuerdo a cada criterio escogiendo los que mejor se adaptaron a los criterios establecidos. El resultado de esta fase fue la selección de las herramientas computacionales Pipe Flow Expert y AFT Fathom 9.

Pipe Flow Expert: Según Pipe Flow (2016), es un software de aplicaciones de ingeniería que permite modelar sistemas de redes de tuberías donde los caudales, pérdidas de presión y requerimientos de bombes necesitan ser calculados. Permite dibujar sistemas en 2D y 3D para analizar y resolver un amplio rango de problemas hidráulicos, así como también el rendimiento d un sistema.

AFT Fathom 9: Applied Flow Technology (2017) presenta el programa como una herramienta practica de modelado y simulaciones de flujo de fluidos en sistema de tuberías. La misma permite modelar un amplio rango de elementos hidráulicos a conveniencia del diseñador y resuelve el sistema utilizando el método de Newton-Raphson y algoritmos desarrollados por la misma empresa para la solución de sistemas de tuberías.

Estos dos programas fueron escogidos bajo los criterios de trabajo y análisis de cada uno, pues utilizan las ecuaciones de gobierno mencionadas en el marco teórico para la resolución de redes, permiten introducir variables de entrada de la red obteniendo como salida los datos resueltos del equilibrio de flujo y características de la red que permitirán ver como se relacionan dichas variables del valor introducido y el obtenido para finalmente poder realizar la caracterización, además ambos resultaron los más adecuados según estos y otros criterios establecidos previamente a la selección.

Fase III: Selección de la red de flujo de fluidos a estudiar

En la presente fase se evaluaron distintas redes de flujo de fluidos con fines a seleccionar una a criterio del investigador que permita obtener información sustancial sobre las redes en general ya que debe tenerse en cuenta que la muestra a utilizar para la investigación debe representar estadísticamente a su población a objeto de poder exteriorizar los resultados obtenidos en la misma y que constituyan un aporte sustancial en el ámbito general de estudio. Para ello se deberá tener en cuenta que la red a seleccionar debe tener elementos que generen interés y sea lo suficientemente compleja para constituir un estudio de interés y lo suficientemente sencilla como para permitir un análisis correcto y viable que se encuentre al alcance que la teoría estudiada y del investigador.

Fase IV: Desarrollar simulaciones con las herramientas computacionales basadas en las características y fundamentos de las redes estudiadas

Luego de seleccionar la red se observaron y listaron cuidadosamente sus características físicas con miras a obtener los datos necesarios para realizar las simulaciones, obtenidos los parámetros requeridos se esquematizaron sus características de la mejor manera posible para luego proceder al modelado en los programas escogidos. Al modelar la red en los programas se procuró adaptar fielmente cada componente y las características presentadas dibujando los tanques, tuberías, nodos y bombas e introduciendo sus parámetros correctamente, posteriormente se llevaron a cabo las simulaciones primero en Pipe Flow Expert y

luego en Fathom 9 para extraer el reporte de los resultados y características obtenido de cada una. Estos resultados están basados en las variables introducidas al momento del modelado, es decir, a las variables de entrada que correspondían con las características de la red antes mencionada y también con los fundamentos señalados en la revisión bibliográfica, ya que los datos introducidos en cada uno de los programas fueron exactamente los mismos y van a determinar lo que resulte del comportamiento de la red, pero el enfoque de resolución lo da cada fabricante. En consecuencia, a lo anterior en esta fase de observo la aplicación de las ecuaciones presentadas en la revisión bibliográfica a través de los programas computacionales.

Fase V: Evaluar las simulaciones y caracterizar los criterios de semejanza y diferencias entre ellas.

En la primera etapa de esta fase se pretendió realizar una validación de los resultados para, antes de establecer cualquier análisis, verificar que los resultados obtenidos por cada programa fueron correctamente calculados, para validar se utilizó el método gráfico donde se resuelve la red esquematizando los principios presentados en el marco teórico a través de las gráficas de cada tramo de tubería, de las pérdidas y de las bombas. El resultado que arrojó el método gráfico no solo fue útil a la hora de determinar la validez de los resultados de los softwares, sino que también permitió evaluar su exactitud permitiendo cuantificar el error presentado por cada uno.

Con objeto de seguir la continuidad de esta fase se elaboró una segunda etapa donde se llevó a cabo la comparación de los resultados obtenidos a través de las dos herramientas computacionales a fin de verificar en qué medida se asemejan o diferencian y así poder validar la precisión de resultado y los principales causantes de las diferencias encontradas. Esta etapa permitió a su vez plantear los criterios de diferencia y semejanza de los programas como tal, evaluando en cada uno entradas, respuestas, accesibilidad, presentación, requerimientos, entre otras características de uso y manejo de los mismos.

Para finalizar esta fase se llevó a cabo una tercera etapa donde finalmente se elaboró la caracterización de los parámetros de la red; luego de comparados los

resultados se establecieron las características de la red con base a los resultados obtenidos y se listaron las variables tanto de entrada como de salida que más influyen en la mismas sugiriendo que dichas variables, en medida de la investigación realizada y de los parámetros evaluados, son los parámetros que principalmente caracterizan una red de flujo de fluidos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Cumpliendo con los procesos metodológicos de ésta investigación, fue posible realizar una serie de indagaciones para comprender el funcionamiento de las redes de flujo de fluidos y obtener programas computacionales que permitieron simular una red escogida para ser analizada y finalmente caracterizar la misma mediante los programas. Prosiguiendo entonces con el hilo investigativo se procede, en el presente capítulo, a presentar los resultados obtenidos realizando un análisis de los mismos en base a los objetivos planteados.

4.1 Identificación de los factores termo-energéticos que intervienen en el estudio de redes de flujo de fluidos

Luego de haber realizado la revisión bibliográfica y de haber buscado antecedentes investigativos y aplicados se lograron identificar los factores termo-energéticos que intervienen en el estudio de las redes de flujo de fluidos. Como es de saber la mecánica de los fluidos es bastante compleja e incluso enfocándose específicamente en el flujo dentro de redes de tuberías, las teorías y ecuaciones que las fundamentan son muchas y podrían extenderse demasiado.

Pero básicamente el objetivo de los ingenieros siempre fue identificar los factores que interrelacionan la descarga en cada tubería y la presión en los nodos, para lo cual se encontró que el método de análisis de redes de tuberías complejas consiste, en general, en la formulación de ecuaciones que representan el balance hidráulico y energético en cada nodo, estas ecuaciones son no lineales y necesitan ser resueltas simultáneamente para obtener el valor deseado que determine la resolución de la red. Las bases del trabajo de análisis de redes son las ecuaciones mencionadas en capítulos anteriores (conocidas como Ecuaciones Q y Ecuaciones H) las cuales a su vez se desarrollan por los principios básicos de la mecánica de fluidos como son la ley de conservación de la masa, ley de conservación de la energía y las relaciones de

fricción que conectan las características físicas de las tuberías y componentes con las pérdidas de energía.

4.1.1 Leyes de la Conservación de la Masa y La Energía

Estas son las leyes básicas que rigen la mecánica de fluidos y son especialmente importantes en el flujo en tuberías, ya que para realizar el balance hidráulico de una red se parte de la premisa de que tanto la energía como la masa que entra debe ser la misma que sale tanto del sistema en general como en cada nodo. A partir de esto se realiza el enfoque de estudio de una red de tuberías donde pueden elaborarse ecuaciones relacionadas con la masa (flujo másico, flujo volumétrico) o la energía (Energía potencial, cinética y de presión) que se obtienen del análisis de cada nodo y tubería pertenecientes a la red. El balance hidráulico se establece entonces mediante la resolución de las ecuaciones obtenidas de las formulaciones Q o H basadas en las fórmulas de continuidad y de Bernoulli para la energía dependiendo el enfoque de las ecuaciones cuál de los dos parámetros (Energía o Masa) sea el desconocido.

4.1.2 Ecuaciones de Pérdidas hidráulicas

Para la realización del balance energético necesario para lograr la solución hidráulica de una red de tuberías, se hace elemental el uso de un modelo de fricción que permita calcular las pérdidas de energía presentes en el sistema. Las pérdidas pueden ser primarias o secundarias, estas últimas están definidas por accesorios y componentes del sistema que se encuentran perfectamente definidas en el mercado de acuerdo el tipo de componente y sus características físicas, pero las primarias dependen de la fricción que genere la tubería.

Atendiendo a estas consideraciones, para calcular las pérdidas por fricción se utiliza el método tradicional de Darcy-Weisbach donde se requiere el cálculo de un factor de fricción que depende de las características de las paredes de las tuberías y del Número de Reynolds, para ello se utiliza la correlación iterativa de Colebrook-White para flujo turbulento y ecuaciones tradicionales para flujo laminar. Otro método de cálculo para pérdidas primarias corresponde al de Hazen-Williams que tiene su propio coeficiente de fricción para cada material de tubería comercialmente

utilizado. Estas leyes son imprescindibles ya que para realizar el balance de energía es necesario identificar la cantidad que se está disipando a expensas de las características físicas del sistema, por lo cual incluir las pérdidas de energía por efecto de la fricción que genera la tubería en el fluido es estrictamente necesario.

4.2 Selección de las herramientas computacionales validadas en el área del análisis de redes de flujo de fluidos

Para la selección de las herramientas computacionales a utilizar se buscaron softwares computacionales que permitieran el análisis y solución de redes flujo de fluido en tuberías bajo los mismos criterios para así poder evaluar el comportamiento de la red en cada uno teniendo la misma entrada, el mismo esquema de proceso y evaluando así la salida lo que permitiría caracterizar diferencias y semejanzas entre estas. Para ello se buscaron varios de los softwares comerciales más utilizados como EPANET, PIPE-FLO, Pipe Flow Expert, DesigNet y AFT Fathom 9 y se estudiaron sus características eligiendo dos que estuviesen al alcance y que fuesen lo bastante populares para ser considerado un buen aporte investigativo a cualquier persona que decida hacer uso de los mismos. El resultado de esto fue la selección de Pipe Flow Expert y AFT Fathom 9 por su accesibilidad, teniendo en cuenta que ambos tienen el mismo esquema de proceso y trabajan con las ecuaciones presentadas en el apartado anterior.

4.3 Selección de la red de flujo de fluidos a estudiar

La selección de la red se llevó a cabo siguiendo el criterio personal del investigador, fue necesario que presentara algunos de los elementos hidráulicos más importantes de manera que fuese posible evaluar una red compleja. Por otro lado la red debía ser lo bastante sencilla para poder ser evaluada correctamente y sin resultados que podrían parecer confusos o muy extensos para su estudio, así como también representar de manera general la construcción básica de las redes de flujo de fluidos representando en la mayor medida posible su población de manera que sea posible extrapolar los resultados obtenidos a otras redes o generalizar fácilmente dichos resultados presentando así una red estadísticamente representativa. El proceso

se realizó mediante la evaluación de cuatro redes que presentaban distintos componentes y serían de sencilla interpretación, de estas se escogió una red (Ver Fig. 6) cuyas propiedades se encuentran listadas en la tabla 1. Como se puede observar; la red cuenta con 5 tanques, 2 nodos, 2 Bombas y 6 tramos de tuberías que deberán ser modelados en los programas. Para el modelado de la bomba se deberá tener en cuenta que tiene un diámetro de 5 pulgadas y se encuentra girando a 3500 RPM, el comportamiento de la misma se puede observar en la tabla 2.

Las propiedades y características del sistema que se encuentran en la tabla 1 serán las variables de entrada del sistema obteniendo en ambos programas como salida el flujo volumétrico

Tabla 1. Propiedades de la Red

Fuente : Leventis (2017)

Fluido	Agua a 15C
Diámetro (in)	T5 = T6 = 3 ; T1 = T2 = T3 = T4 = 2
Longitud (ft)	T5 = T6 = 50 ; T1 = T2 = T3 = T4 = 100
Presión	Todos los tanques se encuentran abiertos a la atmósfera
Altura (ft)	F1 = 80 F2 = 60 F3 = 70 F4 = 0 F5 = 10

Tabla 2. Comportamiento de la Bomba

Fuente: Leventis (2017)

Q (gpm)	H (ft.c.f)
0	120
60	94
100	60

La red seleccionada es catalogada como compleja debido a su estructura y componentes, pero a su vez es bastante sencilla y permitió observar el comportamiento de cada uno de sus componentes en el resultado final, el hecho de

que esté conformada por seis tramos de tubería solamente, permite analizar sin problemas la interacción de cada una con los demás componentes de la red. Se seleccionó una red con el caudal como variable desconocida ya que en el ámbito diario suelen ser más los problemas de diseño con demanda de caudales fijos que determinan la presión para satisfacer dicho caudal y en este caso se decidió demostrar el comportamiento del sistema desde el punto de vista del caudal proporcionando tanques con presión establecida y bombas con comportamiento específico.

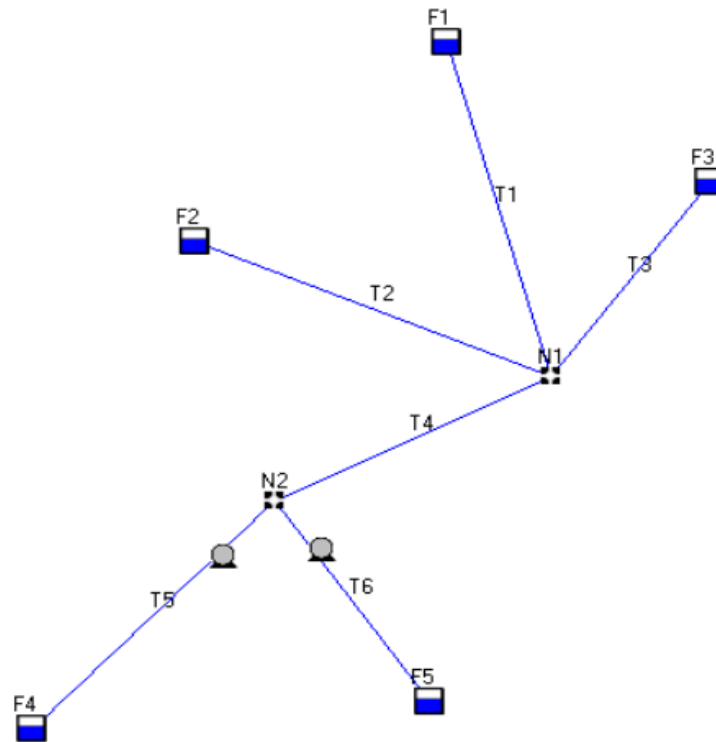


Figura 6: Esquematización de la red de flujo a estudiar

Fuente: Leventis (2017)

4.4 Desarrollar simulaciones con las herramientas computacionales basadas en las características y fundamentos de las redes estudiadas

Luego de seleccionada la red a estudiar y de tener listadas sus principales características se procedió a modelar dicha red en cada uno de los programas computacionales realizando un dibujo esquematizado de cada uno de sus componentes e introduciendo, a medida que cada programa lo solicitaba, los parámetros físicos identificativos de cada componente. Habiendo entonces modelado la red en ambos programas se generaron las simulaciones en cada uno donde según las propiedades obtenidas de la red se presentó la presión de entrada de los tanques como variable conocida obteniendo como resultado los valores de caudales para cada tramo que se utilizarán como variable comparativa de la salida de los dos softwares, en ambos casos se utilizaron los mismos valores de entrada que son los datos o características de la red presentes en las tablas 6 y 7, notando que ambos softwares calculan principalmente los flujos volumétricos o presiones del sistema debiendo, entonces, tener como entrada alguna de las dos variables para obtener la otra como salida pero nunca las dos variables como desconocidas.

En el caso presente, la simulación se llevó a cabo siguiendo el esquema que se presenta en la figura 7 teniendo, como ya se mencionó, como valor de entrada la presión del sistema donde se sabe que todos los tanques se encuentran abiertos a la atmósfera por lo tanto su presión es la atmosférica, como variables de proceso todas aquellas que intervienen en el cálculo de las ecuaciones principales y finalmente como salida el flujo volumétrico. Este último constituyendo en el presente estudio la variable de principal importancia.

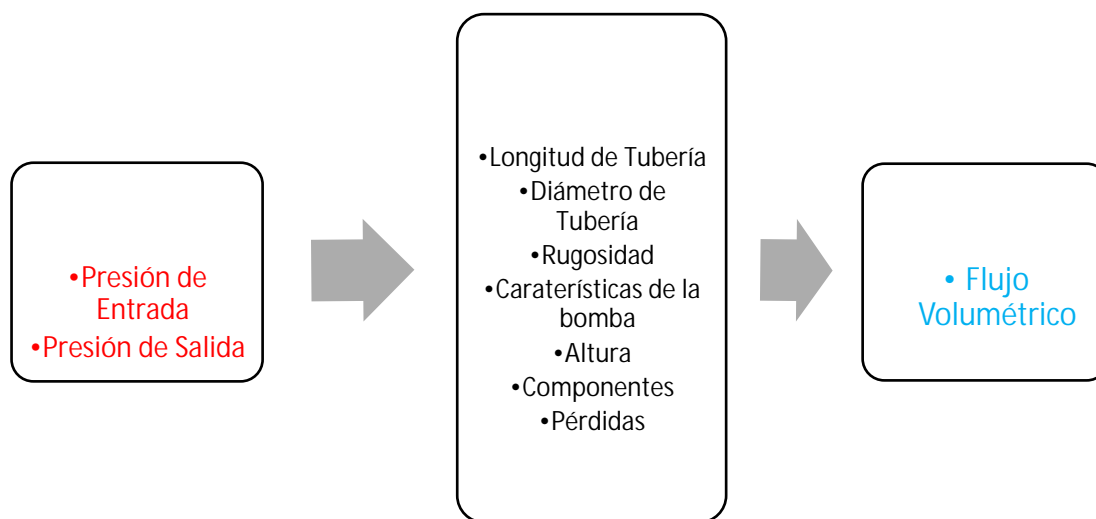


Figura 7: Esquema de proceso utilizado en los programas computacionales

Fuente: Leventis (2017)

4.4.1 Resultados de la simulación en Pipe Flow Expert

La primera simulación realizada fue la del Programa Pipe Flow Expert, en ella se llevó a cabo el modelado de la red con las características iniciales y se procedió a calcularla, primeramente, se observó el esquema gráfico y la simulación del sistema (Ver Figura 8) en la cual se obtienen los caudales resultantes que fueron los presentados en la tabla 3. Además de estos valores también refleja la dirección del flujo que en caso de asumir una dirección incorrecta (como se dio el caso de la tubería 3) el programa la corrige y le da el sentido correcto enviando antes un mensaje de advertencia al usuario al requerir su aprobación, esto resulta útil para asegurar la función de los tanques como se observa en la tabla 4.

Tabla 3. Caudales Obtenidos con Pipe Flow Expert

Fuente: Leventis (2017)

Tubería	Caudal (gpm)
P1	42,37
P2	98,03
P3	60,48
P4	116,14
P5	50,73
P6	65,42

Tabla 4. Función de cada Tanque

Fuente: Leventis (2017)

Tanque	Función
N1	Descarga
N2	Carga
N3	Carga
N4	Descarga
N5	Descarga

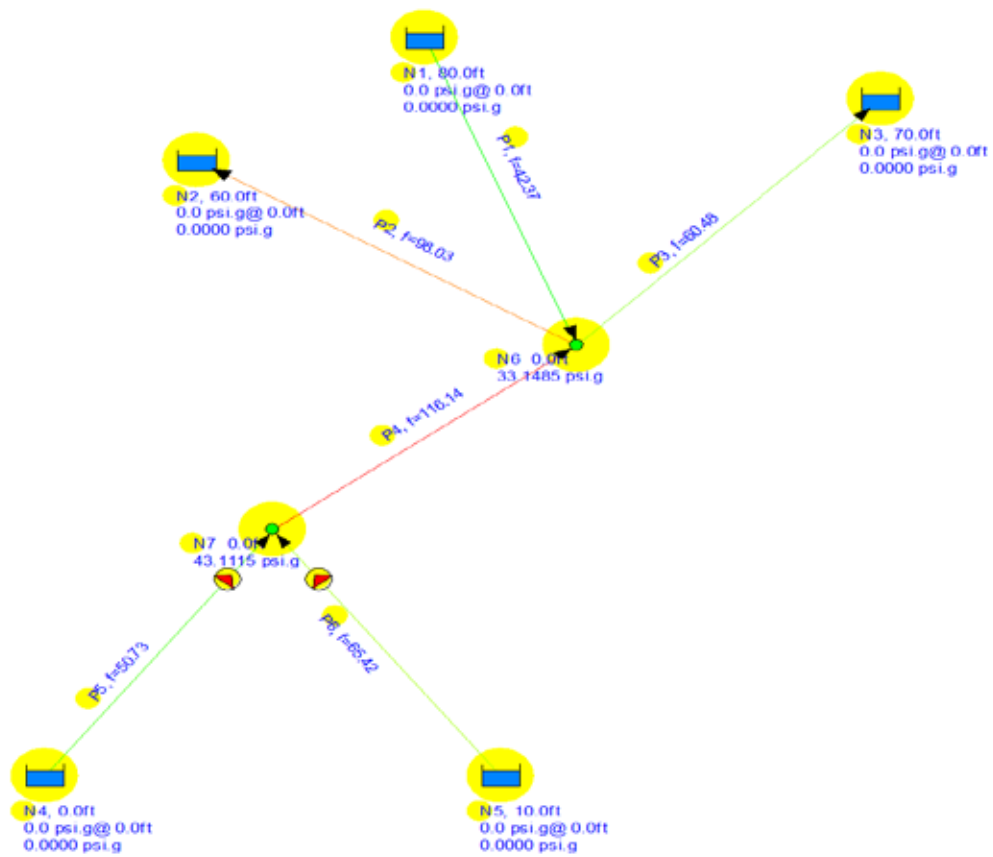


Figura 8: Resultado de Simulación realizada en Pipe Flow Expert

Fuente: Leventis (2017)

4.4.2 Resultado de la simulación realizada en AFT Fathom 9

Luego de realizada la simulación en el primer programa se dio lugar a realizarla en Fathom 9, para ello se tomó la misma red con las mismas características y parámetros de entrada para así obtener resultados similares que permitieran comparar un programa con el otro. El primer resultado observado fue el reporte visual de la red simulada tal como se realizó en el programa anterior (Ver Figura 9) donde se

visualiza el esquema de la red con sus componentes y caudales resultantes. Estos últimos se encuentran listados en la tabla 5. Es de hacer notar que el programa no invierte la dirección colocada en el gráfico de las tuberías, sino que aparece reflejada en los caudales resultantes, el caudal de la tubería colocada en sentido incorrecto aparecerá con signo negativo (-) como referencia de que el mismo se dibujó en sentido contrario, pero en el reporte visual no cambiará su sentido y seguirá apareciendo el incorrecto.

Tabla 5. Caudales Obtenidos en Fathom 9

Fuente: Leventis (2017)

Tubería	Caudal (gpm)
P1	42,37
P2	98,03
P3	-60,48
P4	116,14
P5	50,73
P6	65,42

AFT Fathom Model

C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2.fth

Base Scenario

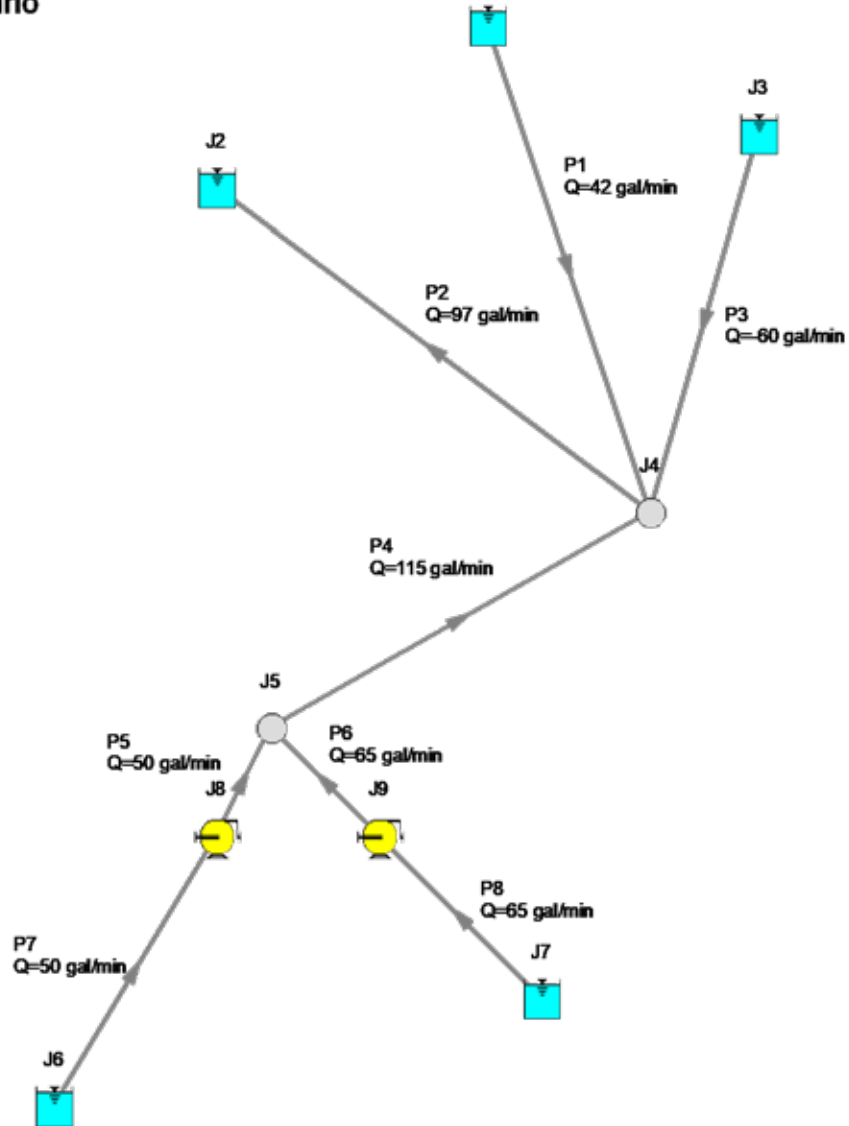


Figura 9: Resultado de simulación realizada en AFT Fathom 9

Fuente: Leventis (2017)

4.4.3 Análisis del resultado de las simulaciones

Ambas simulaciones fueron llevadas a cabo con facilidad, las características físicas de la red seleccionada representan los valores fundamentales a introducir en ambos programas, aunque pueden ser agregados muchos más datos para mejorar la exactitud de los resultados estos fueron suficientes para calcular las simulaciones y es necesario hacer notar que no puede faltar ninguno de ellos ya que la red no podría ser calculada. Al momento de modelar la red, Pipe Flow Expert presenta mayor sencillez aumentando la rapidez de modelado mientras que Fathom lo presenta un poco más complejo dificultando ligeramente el proceso, pero con mejores resultados, este último permite colocar componentes visuales que hacen que el dibujo se vea más realista.

Al momento de generar la simulación ambos programas lo realizan con gran rapidez (En el caso de esta red en particular, no más de 2 segundos) lo cual permite obtener resultados rápidos y rediseñar la red en un corto periodo de tiempo. La respuesta de ambos es bastante buena no solo en rapidez sino igualmente en calidad, éstos permiten escoger el tipo de salida a observar pudiendo variar entre reportes visuales, listas de resultados y generación de reportes completos vía PDF (Ver anexo A).

En el caso del reporte visual resulta más dinámico el realizado por PFE ya que incluye un gradiente de colores que permite identificar valores críticos en las tuberías con valores predeterminados del programa (el usuario puede alterar estos valores para aumentar o disminuir criticidad de los mismos, así como escoger que valor mostrar) y fijando el cursor del mouse encima de un componente permite visualizar los valores principales del mismo mientras que Fathom permite igualmente visualizar los valores pero de manera distinta, el usuario debe escoger en el panel de control del reporte visual que valores mostrar logrando que el reporte de Fathom se vea más sencillo en comparación con el de PFE que puede parecer difícil de entender (Ver figuras 8 y 9) pero una vez identificada la información que despliega es mucho más dinámico e

informativo. En el caso del reporte de datos ambos son bastante parecidos permitiendo seleccionar que valores presentar y de qué manera, aunque el de Fathom resulta más interactivo y con mejor visualización.

4.5 Evaluación de las simulaciones y caracterización los criterios de semejanza y diferencias entre ellas.

En este capítulo se reportó la aplicación y cumplimiento de la metodología discutida, bajo la cual se llevó a cabo el análisis del sistema. Para cumplir el objetivo general y estudiar el comportamiento de la red fue necesario identificar los factores termo-energéticos claves que rigen el comportamiento de una red para en base a ellos escoger un sistema de tuberías y simularlo mediante dos programas computacionales seleccionados para dicho fin. Este apartado presenta el cumplimiento del último objetivo específico y por tanto el general donde se procede a identificar las diferencias y semejanzas de las dos simulaciones realizadas con el fin de, por medio de ellas, caracterizar la red. Para ello se validarán los resultados obtenidos, se compararán entre ellos y finalmente se procederá a realizar la caracterización de la red.

4.5.1 Validación de los resultados

Para validar los resultados obtenidos de cada programa fue necesario realizar el cálculo de los caudales por vía manual, esto permitió tener valores de referencia contra cuales establecer una comparación de los resultados de cada simulación. El cálculo de los caudales de referencia se realizó con el método gráfico (Ver Anexo B) y los valores obtenidos por este método fueron utilizados como patrón permitiendo verificar la validez de los resultados, así como también establecer un margen de error cuantificado entre un programa y el otro, todos los valores y porcentajes de error se presentan en la siguiente tabla

Tabla 6. Resultado de los Programas y su Porcentaje de Error
Fuente: Leventis (2017)

Q (Método Gráfico)	Q (Pipe Flow Expert)	Q (AFT Fathom 9)	% Error Fathom	% Error PFE
41,80	42,37	42,12	0,77	1,36
97,59	98,03	97,45	0,14	0,45
60,19	60,48	59,94	0,42	0,48
115,98	116,14	115,28	0,60	0,14
52,00	50,73	50,26	3,35	2,44
63,98	65,42	65,02	1,63	2,25

La tabla anterior indica que los mayores porcentajes de error pertenecen a Pipe Flow Expert, las diferencias entre uno y otro son pequeñas y el mayor porcentaje de error fue de 3,35% obtenido de Fathom, que, aun teniendo el mayor de los porcentajes, el resto de sus valores se encuentran más cercanos a los del método gráfico que Pipe Flow Expert.

4.5.2 Comparación de los resultados obtenidos a través de las distintas herramientas computacionales.

Las simulaciones realizadas con los programas son el resultado de toda la metodología explicada para el estudio de redes, por lo que es necesario realizar un análisis de ambas para saber cómo conectan las técnicas y conceptos discutidos en los capítulos anteriores. Es necesario discutir también pros y contras de cada software aplicado teniendo en cuenta el comportamiento esperado en cuanto a exactitud y calidad de simulación. Esto nos da la oportunidad de evaluar y establecer un patrón del comportamiento y rendimiento de los programas para futuras aplicaciones.

4.5.2.1 Valores de salida

Los valores de salida de ambos programas se diferencian ligeramente, como se pudo observar en apartados anteriores ambos presentan resultados muy parecidos y se encuentran en un margen de error no mayor a 4%. Con estos resultados se puede inferir que ambos cuentan con una exactitud satisfactoria y teniendo en cuenta que

utilizan el mismo método de resolución de redes con las mismas ecuaciones se procedió a evaluar el motor de cálculo de cada uno para así determinar que esta ligera diferencia en resultados responde en gran medida a la base de datos de cada uno y al proceso de iteraciones.

Esta última en mayor medida ya que ambos utilizan procesos distintos; Pipe Flow Expert utiliza el método de la teoría lineal para aproximar la primera iteración que servirá como suposición inicial al método de Newton Raphson, mientras que Fathom utiliza Eliminación Gaussiana para resolver la matriz de ecuaciones que se genera por el método de Newton. Además de la técnica iterativa utilizada juegan un papel fundamental los criterios de convergencia ya que las técnicas de solución iterativas parten de una aproximación de la solución (o suposición inicial) y ajustan los valores desconocidos a cada iteración hasta que ocurra la convergencia en un punto, el cual sería la solución.

A la vez, elegir el criterio de convergencia (utilizado para determinar si el resultado de una iteración en particular es satisfactorio) es importante. El criterio y las tolerancias mal establecidas pueden resultar en convergencia prematura del proceso iterativo, resultando a su vez en respuestas inexactas, o divergencia debido a que el error total del proceso es mayor a la tolerancia especificada.

En ambos programas el usuario se encuentra en capacidad de modificar estos criterios, lo cual se recomienda si es un sistema muy complicado que así lo requiera y si el usuario tiene un alto grado de conocimiento de la manera exacta en la que los criterios de convergencia interactúan con las variables e iteraciones, de resto la mayoría de sistemas complejos responde de manera satisfactoria al criterio preestablecido por los fabricantes y no se debería cambiar. Por otro lado, la serie de datos que describe el sistema igualmente genera cierto margen de error, aunque en menor medida, en la tabla 7 se pueden observar algunos valores utilizados por cada programa los cuales interfieren directa o indirectamente en las ecuaciones del sistema de solución y que difieren ligeramente entre ellos.

Tabla 7. Valores Básicos de la Base de Datos de los Programas

Fuente: Leventis (2017)

	Densidad (lb/ft ³)	Presión de Vapor (psia)	Rugosidad (in)	Número de Reynolds
PFE	62.303	0.348091	0.001811	-
AFT	62.3773	0.24091	0.0018	-

4.5.2.2 Requerimiento Computacional

Otra de las variables que se tomó en cuenta al realizar la comparación de los programas fueron los parámetros que especifica la casa matriz como indispensables a poseer por el equipo computacional o hardware en el que pretenda desarrollar el usuario las simulaciones de un sistema, estos requerimientos computacionales se listan en la siguiente tabla

Tabla 8. Requerimientos Computacionales de cada programa

Fuente: Leventis (2017)

Requerimiento	Pipe Flow Expert	AFT Fathom 9
Sistema operativo	Microsoft® Windows 10 Microsoft® Windows 8 (excepto RT [utilizado en tabletas basadas en ARM]) Microsoft® Windows 7 Microsoft® Windows Vista Microsoft® Windows XP	Microsoft® Windows 10 Microsoft® Windows 8 (excepto RT [utilizado en tabletas basadas en ARM]) Microsoft® Windows 7

Tabla 8 (Cont.)

Requerimiento	Pipe Flow Expert	AFT Fathom 9
Procesador	1.00 GHz CPU o superior	No especificado
Memoria RAM	2 GB o superior	1 GB o superior (4 GB Recomendados)
Pantalla	1024 x 768 pixeles (resolución mínima) 1920 x 1080 pixeles (o superior recomendada)	1024 x 768 pixeles (resolución mínima)
Gráficos (RAM)	128 Mb o superior	No especificado
Disco Duro	60 Mb para instalación (250 Mb de espacio libre recomendado)	5 GB de Disco duro disponibles
Otros Programas	Microsoft® Excel Adobe® Acrobat Reader	Adobe® Acrobat Reader

Ambos programas se encuentran disponibles solamente para el sistema operativo Windows, Fathom en versiones de Windows 7 o superiores mientras que Pipe Flow Expert puede ser instalado incluso en Windows XP y Vista, aunque no es recomendable ya que podría no funcionar adecuadamente. En cuanto a memoria RAM Pipe Flow Expert exige 2 GB o una memoria superior mientras que Fathom puede utilizarse con 1GB de RAM (Para su mejor rendimiento es recomendable 4GB), ambos exigen la misma resolución de pantalla 1024 x 768 pixeles como resolución mínima y Fathom recomienda 5GB de espacio disponible en el disco duro contra los 250 Mb recomendados por PFE. Podría decirse que Pipe Flow Expert deja un rango más abierto en cuanto al hardware o equipo a utilizar para ser ejecutado que Fathom admitiendo versiones de Windows más antiguas y menor memoria RAM y en disco para funcionar.

4.5.2.3 Acceso y Adquisición del Software

Otro aspecto importante a la hora de evaluar las ventajas de un software contra otro es la accesibilidad del mismo a los usuarios, los aspectos presentados por la casa matriz de cada uno se pueden observar en la tabla 9. Es de hacer notar que a expensas

de la realización de la presente investigación fue necesario acceder a información de los programas por medio de todas las vías que fuesen posibles, de lo cual se da constancia de que ambos fabricantes ofrecen información detallada de los programas y su funcionamiento, así como también documentación relacionada con los mismos como manual del usuario, guías rápidas, guías de ejemplos y documentación técnica. Sin embargo, existe escasa o ninguna información del desempeño y funcionamiento de los softwares fuera de los fabricantes, por lo tanto, se puede decir que la accesibilidad a información y reseñas externas es muy limitada para ambos.

Tabla 9. Accesibilidad de los Programas

Fuente: Leventis (2017)

	Pipe Flow Expert	AFT Fathom 9
Precio	Full 2735\$ Lite 825\$	
Obtención	Descarga desde el sitio Web oficial Mediante representantes comerciales	Descarga desde el sitio Web oficial Mediante representantes comerciales
Versión de Prueba	Disponible en la Web oficial	Disponible en la Web oficial
Software educacional	Versión educacional no disponible	Versión educacional disponible por 10\$ anuales

Ambos programas son igualmente accesibles ya que pueden descargarse desde la web de los fabricantes de manera segura, Pipe Flow Expert ofrece la obtención de la licencia por la misma vía, ofreciendo una licencia full y una más económica, pero

con un límite de hasta 25 tuberías. Fathom 9, sin embargo, solo ofrece la licencia por medio de aliados comerciales lo que proporciona soporte regional para los países que cuenten con comercios autorizados, pero limitando la obtención.

Ambos tienen versiones de prueba que pueden ser descargadas del sitio web del fabricante y pueden ser utilizadas durante 30 días con ciertas limitaciones, ambas permiten cargar resolver y calcular sistemas de ejemplos de la librería, revisar los manuales y ver resultados de sistemas, así como también diseñar sistemas con un límite de 5 tramos de tuberías. Fathom, en este caso, aventaja con su versión estudiantil del software que permite por un precio bastante económico los mismos beneficios de la versión full con un límite de diseño de 12 tuberías lo que supone poco más de la mitad de la limitante del Pipe Flow Expert Lite, pero a un precio de 800\$ menos.

4.5.3 Caracterización de la Red

Luego de llevar a cabo la revisión bibliográfica y las simulaciones en cada programa, se logró realizar el análisis de los factores que intervienen en las redes de flujo de fluidos y de los programas computacionales disponibles para el análisis de las mismas, de esto se puede afirmar que los principales parámetros que caracterizan una red vienen dados por los datos que describen físicamente la misma. En ambos programas son indispensables ciertos valores para realizar el modelado y balance hidráulico de una red y se van identificando a medida que se realiza el modelado ya que cada programa va alertando al usuario acerca de que parámetros se requieren para definir la red, estos parámetros según se comprobó en cada programa corresponden a los parámetros físicos mencionados anteriormente, por lo tanto aunque una red para ser resuelta requiera de modelos matemáticos y métodos iterativos, para ser modelada y formular las ecuaciones se requieren los datos físicos de cada uno de sus componentes.

Entonces, es admisible sugerir que una red se puede caracterizar por los siguientes parámetros: Diámetro de tuberías, longitud de las tuberías, coeficiente de

rugosidad. altura de los nodos y tanques, comportamiento de la bomba, presiones de entrada y salida y demanda de Fluido.

Con la finalidad de ver cómo y en qué medida influyen las variables características sobre la red, se decidió llevar a cabo otras simulaciones donde se presentarán 5 distintos escenarios donde en el primero se presentó la red en sus condiciones originales y en los siguientes se alteraron sus principales características (Ver tabla 10), teniendo en cuenta que nuestra variable de entrada es la presión y de salida el flujo volumétrico se tomaron las variables de proceso para los escenarios.

Tabla 10. Variables de los Escenarios

Fuente: Leventis (2017)

Escenario	Variable	Valor original	Valor Nuevo
1	-	-	-
2	Longitud	100	80
3	Diámetro	2"	3"
4	Altura	80, 60, 70	70, 60, 50
5	Accesorios	Sin accesorios	Accesorios básicos

Tabla 11. Resultados de los Escenarios

Fuente: Leventis (2017)

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
P1	42.12	44.79	180.08	117.19	39.88
P2	97.45	110.69	241.09	108.69	92.73
P3	59.94	69.33	106.9	124.03	57.38
P4	115.28	135.23	167.91	115.53	110.24
P5	50.26	61.06	78.41	50.4	47.52
P6	65.02	74.17	89.5	65.13	62.71

En la tabla 10 se puede observar un resumen de los parámetros que se modificaron y en el anexo C se pueden encontrar los reportes completos de las simulaciones de los escenarios. El escenario 1, como ya se mencionó, se refiere al modelo inicial escogido con todos los datos exactamente como se presentaron en apartados anteriores y los valores de resultado corresponden a los de AFT Fathom 9 que demostraron ser los más exactos, en la tabla 11 se listan los resultados de todos los escenarios. En el escenario 2 se redujeron las longitudes de las tuberías 1,2 y 3 en un 20% y la tubería 4 en un 50% lo que arrojó como resultado un aumento en los caudales debido a la reducción de pérdidas por fricción consecuente a las longitudes, estos valores no pueden relacionarse de manera exacta con cada caudal resultante debido a que no se modificaron todos los tramos y tampoco en una misma medida, pero en promedio la longitud total de la tubería se redujo en un 18,3% y el caudal total que maneja la red aumento en 15% lo cual quiere decir que el caudal responde al cambio de la longitud, como era de esperarse, de manera inversa pero en menor medida con un margen del 3%.

El escenario 3 se compuso de la red original con variaciones en los diámetros, donde las tuberías 1,2,3 y 4 fueron modificadas de 2 a 3 pulgadas obteniendo como resultado el aumento del caudal en 120% con lo que se puede decir que por una pulgada de diámetro el caudal vario poco más del doble, lo que era de esperarse ya que el caudal se encuentra relacionado de manera directamente proporcional al área de tubería, pero igualmente estos valores modifican directamente la velocidad del fluido en la tubería, notando tanto aumento como disminución en gran medida, dependiendo de la configuración de las mismas. En el escenario 4 se trabajó modificando la configuración de los tanques, donde se mantuvo la presión, pero se modificó la elevación de los mismos, el tanque uno que se encuentra descargando se bajó 10 ft y el tanque 3 que carga se bajó 20 ft para observar.

El quinto y último escenario se utilizó para observar en qué medida afectan los accesorios el flujo volumétrico de la red, esta inicialmente se presentó libre de accesorios y en la simulación principal no se agregaron los mismos para sus efectos,

así que en este escenario se agregaron los accesorios más básicos como son las conexiones de los nodos donde se agregaron tees y codos donde correspondía y las entradas y salidas de los tanques, cabe destacar que cada elemento tiene su coeficiente de resistencia estandarizado y ambos programas manejan los mismos valores, en total se agregó 7,44 en coeficiente K de resistencia obteniendo como resultado una disminución del caudal de menos del 4%, se logró observar que las pérdidas de cada tubería aumentaron muy poco (Ver Anexo C), por lo que se puede decir que para efectos del caudal las pérdidas menores o en accesorios pueden ser despreciables.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los dos principios básicos bajo los que se rigen las redes de tuberías son la conservación de la masa y la conservación de energía incluyendo las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams para definir la relación entre las pérdidas de cabezal y la descarga de una tubería. no es necesario introducir otros conceptos ya que con estas es posible realizar el balance hidráulico de la red. A partir de estas se realiza la formulación de ecuaciones H y Q o DQ dependiendo en el parámetro desconocido, estas formulaciones deben resolverse con un método iterativo.

La solución iterativa alcanzada por un problema en particular es función de la formulación de ecuaciones, el proceso numérico, punto de partida y el criterio de convergencia. El criterio de convergencia no define una solución sino un número de posibles soluciones dentro el rango absoluto de las tolerancias.

Las herramientas computacionales seleccionadas fueron Pipe Flow Expert y AFT Fathom 9, ambas son herramientas validadas muy utilizadas en el área de del análisis de redes de flujo de fluidos para el cálculo de caída de presiones y distribución de flujos. Las pérdidas por fricción son calculadas con la ecuación de Darcy-Weisbach obteniendo el factor de fricción por medio de la fórmula de Colebrook-White. Pipe Flow Expert resuelve las ecuaciones resultantes con una combinación del método de la teoría lineal con el método de Newton, mientras que Fathom 9 utiliza el método Newton y la eliminación Gaussiana para la resolución de la matriz de ecuaciones.

La red fue modelada en los dos programas de manera satisfactoria modelando las características proporcionadas con la presión como variable conocida obteniendo como resultado los caudales y su distribución. Pipe Flow Expert demostró ser más sencillo a la hora de modelar proporcionando rapidez, pero Fathom permite un modelado más completo incluyendo componentes visuales. Ambos programas simularon la red modelada en menos de dos segundos y proporcionaron los respectivos reportes, donde el más satisfactorio fue el reporte visual de Pipe Flow Expert.

Los valores de caudal obtenidos de las simulaciones se compararon con valores patrón resultando que ambos programas arrojaron caudales con un máximo de error del 3% considerándose Fathom 9 el más preciso, pero ambos tienen bastante exactitud. La diferencia de los resultados entre un programa y el otro demostró corresponder tanto al método iterativo como al criterio de convergencia utilizado por cada uno. También se encontraron ligeras diferencias en datos presentes en la base de datos de cada uno, y en el proceso se encontró que la base de datos de fluidos y accesorios de Fathom es bastante reducida.

Los resultados de las simulaciones y la revisión bibliográfica arrojaron que el análisis de distribución de agua tiene dos componentes claves; primero el grupo de datos que describe el sistema y segundo la técnica de solución que realiza los cálculos. Los datos están compuestos por información que describe las características físicas del sistema como diámetro de tubería, longitud y coeficientes de rugosidad, altura de nodos y tanques, y las relaciones flujo y presión de descarga de las bombas. Además de las características físicas del sistema, la demanda o consumo de agua es requerido. Las técnicas de solución de redes usan este grupo de datos y resuelven para flujos, velocidades y presiones desconocidas. Por lo tanto, se puede concluir que, en general, para

fines de análisis y diseño una red de flujo de fluidos en tuberías puede ser caracterizada por este grupo de datos.

Luego de variar alguno de estos parámetros y modelar 4 escenarios más aparte del inicial para determinar su efecto en la red dedujo que la longitud de una tubería actúa inversamente proporcional al caudal obtenido, mientras que el diámetro, por el contrario, es proporcional. También se demostró que para efectos de análisis de flujo en una tubería que contenga accesorios básicos, los mismos pueden ser despreciados ya que no ofrecen gran resistencia y las pérdidas de tubería se ven poco afectadas, en este caso solo disminuyeron el caudal en un 4%.

Finalmente, luego de analizar los dos programas se determinó que Pipe Flow Expert tiene un funcionamiento más sencillo mientras que Fathom un poco más complicado, pero más completo, éste último ofrece la posibilidad de trabajar con multiescenarios, así como también módulos especiales que permiten realizar simulaciones extendidas. Por otro lado, se encuentra limitado a fluidos incompresibles y para este efecto se debe adquirir el software de AFT Arrow, al igual que para contar con una buena base de datos de fluidos es necesario adquirir el software adicional CHEMPAK de AFT inquiriendo en un gasto extra del valor del programa, mientras que Pipe Flow cuenta con una buena librería y tiene la posibilidad cambiar la opción del motor de cálculo para el uso de ecuaciones para fluidos compresibles.

5.2 Recomendaciones

Al empezar a modelar en softwares computacionales se recomienda revisar los ejemplos presentes en la biblioteca y la documentación de ayuda al usuario para la comprensión del programa ya que la interfaz de cada uno es distinta.

Al trabajar con la modificación de los diámetros de tubería tener especial cuidado con las velocidades en las tuberías, pues las mismas aumentarán o

disminuirán de acuerdo a la configuración de la tubería y las altas velocidades del fluido están directamente relacionadas a la corrosión, así como muy bajas velocidades contribuyen con la obstrucción de las tuberías.

Igualmente, al rediseñar cualquier otro parámetro debe revisarse bien en qué medida cambiaron los demás ya que podrían presentarse errores de diseño que en un principio no se encontraban presentes.

Se recomienda para uso profesional e investigativo el AFT Fathom 9 por su precisión y cantidad de funciones extra que aportan precisión y facilidad de diseño y análisis permitiendo, incluso, la introducción de datos para análisis de costos.

Para fines educativos se recomienda el Pipe Flow Expert ya que es más sencillo y resulta más económico. No se recomienda el uso de la Versión Lite ni del Fathom estudiantil ya que se encuentran grandemente limitados en números de tuberías para diseño.

REFERENCIAS

- Arias, F. (1997). **El Proyecto de Investigación**. 1ra Edición. Editorial Episteme. Caracas, Venezuela.
- Borja, M. (2012): **Metodología de la investigación científica para ingenieros**. Chiclayo, Perú.
- Casali, D. (2013). Cuantificación de la incertidumbre en sistemas de flujo en tuberías”. Politécnico di Milano, Italia. Recuperado de https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/82601/1/Uncertainty%20quantification%20in%20pipe%20flow%20systems%20%20Daniele%20Casali_780856_PoliMi.pdf
- Chapra, S. & Canale, R. (2010): **Numerical Methods for Engineers**. Editorial McGraw Hill. New York, EEUU.
- Córdoba, B., Suarez, E. (2008). **Evaluación hidráulica de la red de recolección de gas del campo Sipororo, ubicado en los límites del Estado Barinas**. Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela. Recuperado de <http://ri.biblioteca.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2755/1/060-TESES.IQ.pdf>
- Cross, H. (1936). **Analysis of Flow in networks of conduits or conductors**. **University of Illinois Bulletin**. Vol XXXIV. Recuperado de <https://www.ideals.illinois.edu>

- Ellis, D. (2001). **The Behaviour of Pipe Network Analysis Solution Techniques.** The University of Adelaide. Australia. Recuperado de <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/21926/9/01front.pdf>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C. & Baptista P. (2014). **Metodología de la Investigación.** 6ta Edición. Editorial McGraw Hill. México DF.
- Jiménez, C., Molina, Y. (2013). **Análisis de procesos de combustión en motores de combustión interna a través de herramientas computacionales.** Venezuela, Valencia, Universidad de Carabobo.
- Larock, B., Jeppson, R. & Watters, G. (2000). **Hydraulics of Pipeline Systems.** Editorial CRC Press LLC. Boca Ratón, EEUU.
- Mott, R. (2006). **Mecánica de fluidos.** Editorial Pearson Educación. México.
- Pardinas, F. (1982). **Metodología y Técnicas de Investigación en Ciencias Sociales.** Editorial Siglo XXI Editores. México
- Rodríguez, Y. (2003). **La experiencia de Investigar.** Fondo Editorial Predios. Venezuela.
- Ssenozi, I. (2016). **Pérdidas de energía en sistemas hidráulicos de plantas de tratamiento de agua”.** Universidad de Lund, Suecia. Recuperado de
- Stracuzzi, P. (2003). **Metodología de la investigación cuantitativa.** Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador.



Reporte de la simulación de Pipe Flow Expert



Figura A-1: Portada del reporte de resultados

Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

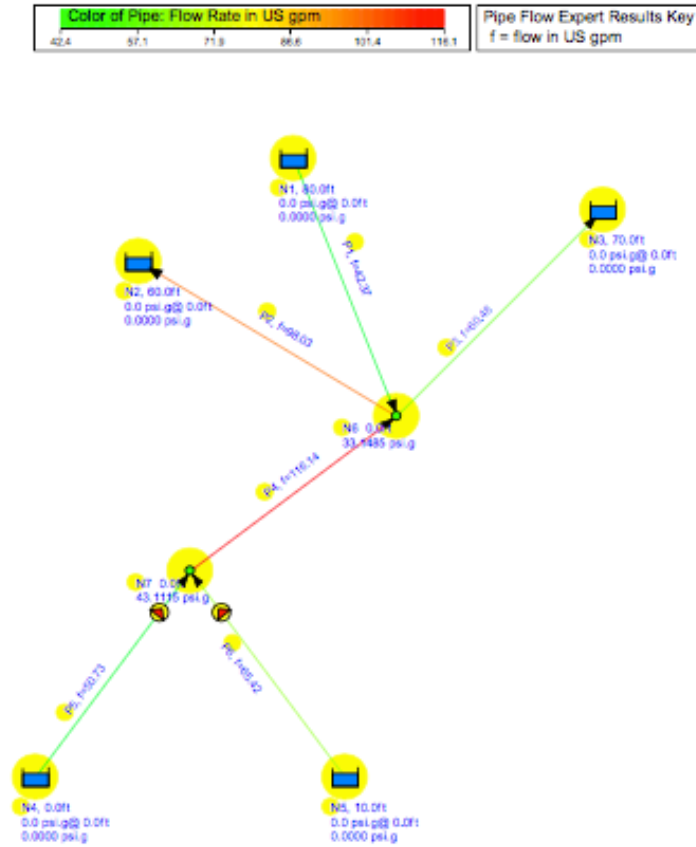


Figura A-2: Reporte Visual
Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

Fluid Data

Zone	Fluid Name	Chemical Formula	Temperature °F	Pressure psi.g	Density lb/ft ³	Centistokes	Centipoise	Vapour Pressure psi.a	State
1	Water	H2O	68.000	0.0000	62.303	1.000	1.002	0.348091	Liquid

Figura A-3: Datos del fluido
Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

Pump Data

Pipe Id	Pipe Name	Pump Name	Speed rpm	Pref. Cp From US gpm	Pref. Cp To US gpm	Flow In/Out US gpm	Velocity ft/sec	Suction Pressure psi.g	Discharge Pressure psi.g	Pump Head (+) ft.hd fluid	Pump NPSHr ft.hd (absolute)	Pump NPSHa ft.hd (absolute)	Pump Efficiency Percentage	Pump Power Horsepower
5	P5	Pump	3500	0.00	0.00	50.73	2.202	-0.1157	43.1404	99.977	0.000	32.89	Not known	Not Known
6	P6	Pump	3500	0.00	0.00	65.42	2.839	4.1416	43.1578	90.177	0.000	42.73	Not known	Not Known

Figura A-4: Datos de las bombas

Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

Pump Data		Fluid Data	
Name:	Pump	Fluid:	Water
Catalog:		Density:	62.303 lb/ft ³
Manufacturer:		Viscosity:	1.0020 cP
Type:		Temperature:	68.000 °F
Size:		Vapor Pressure:	0.3481 psia
Stages:	0	Atm Pressure:	14.6959 psia
Speed:	3500 Rpm	Design Curve	
Impeller Diam:	5.000 Inch	Shutoff Head:	120.00 ft.hd Fluid
Min Speed:	Not Specified	Shutoff dP:	51.9193 psi.g
Max Speed:	Not Specified	BEP:	0.0% @ 0.00 US gpm
Min Diam:	Not Specified	Power at BEP:	
Max Diam:	Not Specified		

Figura A-5: Datos de la Bomba 1

Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

Pump Data		Fluid Data	
Name:	Pump	Fluid:	Water
Catalog:		Density:	62.303 lb/ft ³
Manufacturer:		Viscosity:	1.0020 cP
Type:		Temperature:	68.000 °F
Size:		Vapor Pressure:	0.3481 psi.a
Stages:	0	Atm Pressure:	14.6959 psi.a
Speed:	3500 Rpm	Design Curve	
Impeller Diam:	5.000 inch	Shutoff Head:	120.00 ft.hd Fluid
Min Speed:	Not Specified	Shutoff dP:	51.9193 psi.g
Max Speed:	Not Specified	BEP:	0.0% @ 0.00 US gpm
Min Diam:	Not Specified	Power at BEP:	
Max Diam:	Not Specified		

Figura A-6: Datos de la bomba 2

Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

Pipe Data

Pipe Name and Notes	Inner Diameter Inch	Roughness Inch	Length ft	Total K	Flow US gpm	Velocity ft/sec	Entry Elevation ft	Exit Elevation ft	Entry Pressure PSI.g	Exit Pressure PSI.g	Friction Loss ft.hd
P1	2.067	0.001811	100.000	0.0000	42.37	4.651	60.000	0.000	0.0000	33.1485	3.38
P2	2.067	0.001811	100.000	0.0000	98.03	9.373	0.000	60.000	33.1485	0.0000	16.62
P3	3.067	0.001811	100.000	0.0000	60.48	5.783	0.000	70.000	33.1485	0.0000	6.62
P4	2.067	0.001811	100.000	0.0000	116.14	11.105	0.000	0.000	43.1115	33.1485	23.03
P5	3.068	0.001811	50.000	0.0000	50.73	2.202	0.000	0.000	0.0000	43.1115	0.33
P6	3.068	0.001811	50.000	0.0000	65.42	2.839	10.000	0.000	0.0000	43.1115	0.53

Figura A-7: Datos de las tuberías

Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

Node Data

Node Id	Node Type	Node	Elevation ft	Liquid Level ft	Surface Press. psi.g	Press. at Node psi.g	HGL at Node ft.hd ft/ft	Demand In US gpm	Demand Out US gpm	Total Flow In US gpm	Total Flow Out US gpm
1	Tank	N1	80.000	0.000	0.0000	0.0000	80.00	N/A	N/A	0.00	42.37
2	Tank	N2	60.000	0.000	0.0000	0.0000	60.00	N/A	N/A	98.03	0.00
3	Tank	N3	70.000	0.000	0.0000	0.0000	70.00	N/A	N/A	60.48	0.00
4	Tank	N4	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.00	N/A	N/A	0.00	50.73
5	Tank	N5	10.000	0.000	0.0000	0.0000	10.00	N/A	N/A	0.00	65.42
6	Join Point	N6	0.000	N/A	N/A	33.1485	76.62	0.00	0.00	158.51	158.51
7	Join Point	N7	0.000	N/A	N/A	43.1115	99.64	0.00	0.00	116.14	116.14

Figura A-8: Datos de los nodos

Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

Energy Data

Pipe Id	Pipe Name	Energy Loss To Pipe Friction	Energy Loss To Pipe Fittings	Energy Loss To Pipe Components	Energy Loss To Pipe Control Valves	Energy Loss To Pump Inefficiency	SUBTOTAL Loss Pipe Items + Pump	Energy Loss To Discharge Pressure	Energy Loss To Change in Elevation	TOTAL USED Sum of All Items
		Horsepower	Horsepower	Horsepower	Horsepower	Horsepower	Horsepower	Horsepower	Horsepower	Horsepower
1	P1	0.036189	0.000000	0.000000	0.000000	N/A	0.036189	0.000000	-0.855385	-0.819196
2	P2	0.411079	0.000000	0.000000	0.000000	N/A	0.411079	0.000000	1.484457	1.895536
3	P3	0.100590	0.000000	0.000000	0.000000	N/A	0.100590	0.000000	1.068512	1.169102
4	P4	0.675004	0.000000	0.000000	0.000000	N/A	0.675004	0.000000	0.000000	0.675004
5	P5	0.004280	0.000000	0.000000	0.000000	Efficiency Not Specified	0.004280	0.000000	0.000000	0.004280
6	P6	0.008826	0.000000	0.000000	0.000000	Efficiency Not Specified	0.008826	0.000000	-0.165099	-0.156273

Figura A-9: Reporte de pérdidas de energía

Fuente: Pipe Flow Expert (2017)

Reporte de la simulación en AFT Fathom 9

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 1 Fotini			AFT Fathom Model								
<u>General</u>											
Title: AFT Fathom Model Input File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2.fth Scenario: Base Scenario											
Number Of Pipes= 8 Number Of Junctions= 9											
Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Pressure Relaxation= (Automatic)											
Constant Fluid Property Model Fluid Database: AFT Standard Fluid: Water at 1 atm Max Fluid Temperature Data= 212 deg. F Min Fluid Temperature Data= 32 deg. F Temperature= 15 deg. C Density= 62.3773 lbm/ft ³ Viscosity= 2.76991 lbm/hr-ft Vapor Pressure= 0.24091 psia Viscosity Model= Newtonian Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Control Valve, Spray Discharge, Relief Valve											
Ambient Pressure (constant)= 1 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300											
<u>Pipes</u>											
Pipe	Name	Pipe Defined	Length	Length Units	Hydraulic Diameter	Hydraulic Diam. Units	Friction Data Set	Roughness	Roughness Units	Losses (K)	Initial Flow
1	Pipe	Yes	100	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0	
2	Pipe	Yes	100	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0	
3	Pipe	Yes	100	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0	
4	Pipe	Yes	100	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0	
5	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0	
6	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0	
7	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0	
8	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0	

Figura A-10: Información general del sistema

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 4 Fotini			AFT Fathom Model						
Reservoir	(Pipe #20) K In, K Out	(Pipe #21) K In, K Out	(Pipe #22) K In, K Out	(Pipe #23) K In, K Out	(Pipe #24) K In, K Out	(Pipe #25) K In, K Out	(Pipe #1) Depth	(Pipe #2) Depth	
1							(P1) 0		
2							(P2) 0		
3							(P3) 0		
6							(P7) 0		
7							(P8) 0		
Reservoir	(Pipe #3) Depth	(Pipe #4) Depth	(Pipe #5) Depth	(Pipe #6) Depth	(Pipe #7) Depth	(Pipe #8) Depth	(Pipe #9) Depth	(Pipe #10) Depth	(Pipe #11) Depth
1									
2									
3									
6									
7									
Reservoir	(Pipe #12) Depth	(Pipe #13) Depth	(Pipe #14) Depth	(Pipe #15) Depth	(Pipe #16) Depth	(Pipe #17) Depth	(Pipe #18) Depth	(Pipe #19) Depth	
1									
2									
3									
6									
7									
Reservoir	(Pipe #20) Depth	(Pipe #21) Depth	(Pipe #22) Depth	(Pipe #23) Depth	(Pipe #24) Depth	(Pipe #25) Depth	Pipe Depth Units		
1							feet		
2							feet		
3							feet		
6							feet		
7							feet		
Model Reference Information									
<u>General</u>									
Title: AFT Fathom Model									
Analysis run on: 10/4/2017 7:07:55 PM									
Application version: AFT Fathom Version 9 (2015.09.01)									
Input File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2.fth									
Scenario: Base Scenario									
Output File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2_1.out									
Execution Time= 1.25 seconds									
Total Number Of Head/Pressure Iterations= 5716									
Total Number Of Flow Iterations= 362									
Total Number Of Temperature Iterations= 0									
Number Of Pipes= 8									
Number Of Junctions= 9									
Matrix Method= Gaussian Elimination									

Figura A-11: Información General del Modelo

Fuente: Pipe AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 5 Fotini	AFT Fathom Model																																											
<p>Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Flow relaxation automatically lowered to 0.01 Pressure Relaxation= (Automatic)</p> <p>Constant Fluid Property Model Fluid Database: AFT Standard Fluid: Water at 1 atm Max Fluid Temperature Data= 212 deg. F Min Fluid Temperature Data= 32 deg. F Temperature= 15 deg. C Density= 62.3773 lbm/ft3 Viscosity= 2.76991 lbm/hr-ft Vapor Pressure= 0.24091 psia Viscosity Model= Newtonian Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Control Valve, Spray Discharge, Relief Valve</p> <p>Ambient Pressure (constant)= 1 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300 Total Inflow= 157.4 gal/min Total Outflow= 157.4 gal/min Maximum Static Pressure is 57.98 psia at Pipe 5 Inlet Minimum Static Pressure is 14.11 psia at Pipe 2 Outlet</p> <p>Warnings</p> <p>No Warnings</p> <p><u>Pump Summary</u></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Jct</th> <th>Results Diagram</th> <th>Name</th> <th>Vol. Flow (gal/min)</th> <th>Mass Flow (lbm/sec)</th> <th>dP (psid)</th> <th>dH (feet)</th> <th>Overall Efficiency (Percent)</th> <th>Speed (Percent)</th> <th>Overall Power (hp)</th> <th>BEP (gal/min)</th> <th>% of BEP (Percent)</th> <th>NPSHA (feet)</th> <th>NPSHR (feet)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8</td> <td>Show ...</td> <td>Pump</td> <td>50.26</td> <td>6.985</td> <td>43.43</td> <td>100.26</td> <td>N/A</td> <td>100.0</td> <td>1.273</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>33.10</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Show ...</td> <td>Pump</td> <td>65.02</td> <td>9.036</td> <td>39.19</td> <td>90.46</td> <td>N/A</td> <td>100.0</td> <td>1.486</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>42.94</td> <td>N/A</td> </tr> </tbody> </table> <p><u>Reservoir Summary</u></p>			Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (gal/min)	Mass Flow (lbm/sec)	dP (psid)	dH (feet)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)	8	Show ...	Pump	50.26	6.985	43.43	100.26	N/A	100.0	1.273	N/A	N/A	33.10	N/A	9	Show ...	Pump	65.02	9.036	39.19	90.46	N/A	100.0	1.486	N/A	N/A	42.94	N/A
Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (gal/min)	Mass Flow (lbm/sec)	dP (psid)	dH (feet)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)																															
8	Show ...	Pump	50.26	6.985	43.43	100.26	N/A	100.0	1.273	N/A	N/A	33.10	N/A																															
9	Show ...	Pump	65.02	9.036	39.19	90.46	N/A	100.0	1.486	N/A	N/A	42.94	N/A																															

Figura A-12: Reporte de Bombas

Fuente: AFT Fathom 9(2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 6 Fotini				AFT Fathom Model							
Jct	Name	Type	Liq. Height (feet)	Liq. Elevation (feet)	Surface Pressure (psia)	Liquid Volume (feet3)	Liquid Mass (lbm)	Net Vol. Flow (gal/min)	Net Mass Flow (lbm/sec)		
1	Reservoir	Infinite	N/A	80.00	14.70	N/A	N/A	-42.12	-5.853		
2	Reservoir	Infinite	N/A	60.00	14.70	N/A	N/A	97.45	13.544		
3	Reservoir	Infinite	N/A	70.00	14.70	N/A	N/A	59.94	8.330		
6	Reservoir	Infinite	N/A	0.00	14.70	N/A	N/A	-50.26	-6.985		
7	Reservoir	Infinite	N/A	10.00	14.70	N/A	N/A	-65.02	-9.036		

Pipe	Name	Vol. Flow Rate (gal/min)	Velocity (feet/sec)	P Static Max (psia)	P Static Min (psia)	Elevation Inlet (feet)	Elevation Outlet (feet)	dP Stag. Total (psid)	dP Static Total (psid)	dP Gravity (psid)	dH (feet)
1	Pipe	42.12	4.027	47.79	14.59	80.00	0.00	-33.20787	-33.20787	-34.654	3.33857
2	Pipe	97.45	9.318	47.32	14.11	0.00	60.00	33.20787	33.20787	25.991	16.66143
3	Pipe	59.94	5.731	47.68	14.47	0.00	70.00	33.20787	33.20787	30.322	6.66143
4	Pipe	115.28	11.022	57.16	47.09	0.00	0.00	10.07580	10.07580	0.000	23.26030
5	Pipe	50.26	2.181	57.98	57.95	0.00	0.00	0.03065	0.03065	0.000	0.07076
6	Pipe	65.02	2.822	57.97	57.93	0.00	0.00	0.04834	0.04834	0.000	0.11159
7	Pipe	50.26	2.181	14.66	14.55	0.00	0.00	0.11634	0.11634	0.000	0.26858
8	Pipe	65.02	2.822	18.79	14.64	10.00	0.00	-4.14499	-4.14499	-4.332	0.43116

Pipe	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Flow Area (feet2)	Hyd. Diameter (inches)	Pipe Nominal Size	Pipe Material	Roughness	Reynolds No.	Pipe Type-Schedule
1	14.59	47.79	14.70	47.90	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.623E+04	STD (schedule 40)
2	47.32	14.11	47.90	14.70	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.301E+05	STD (schedule 40)
3	47.68	14.47	47.90	14.70	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	8.003E+04	STD (schedule 40)
4	57.16	47.09	57.98	47.90	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.539E+05	STD (schedule 40)
5	57.98	57.95	58.01	57.98	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	4.521E+04	STD (schedule 40)
6	57.97	57.93	58.03	57.98	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.849E+04	STD (schedule 40)
7	14.66	14.55	14.70	14.58	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	4.521E+04	STD (schedule 40)
8	14.64	18.79	14.70	18.84	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.849E+04	STD (schedule 40)

Jct	Name	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Vol. Flow Rate Thru Jct (gal/min)	Mass Flow Rate Thru Jct (lbm/sec)	Loss Factor (K)
1	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	42.12	5.853	0
2	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	97.45	13.544	0
3	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	59.94	8.330	0
4	Branch	47.52	47.52	47.90	47.90	N/A	N/A	0
5	Branch	57.79	57.79	57.98	57.98	N/A	N/A	0
6	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	50.26	6.985	0

Figura A-13: Reporte de tuberías y Nodos

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

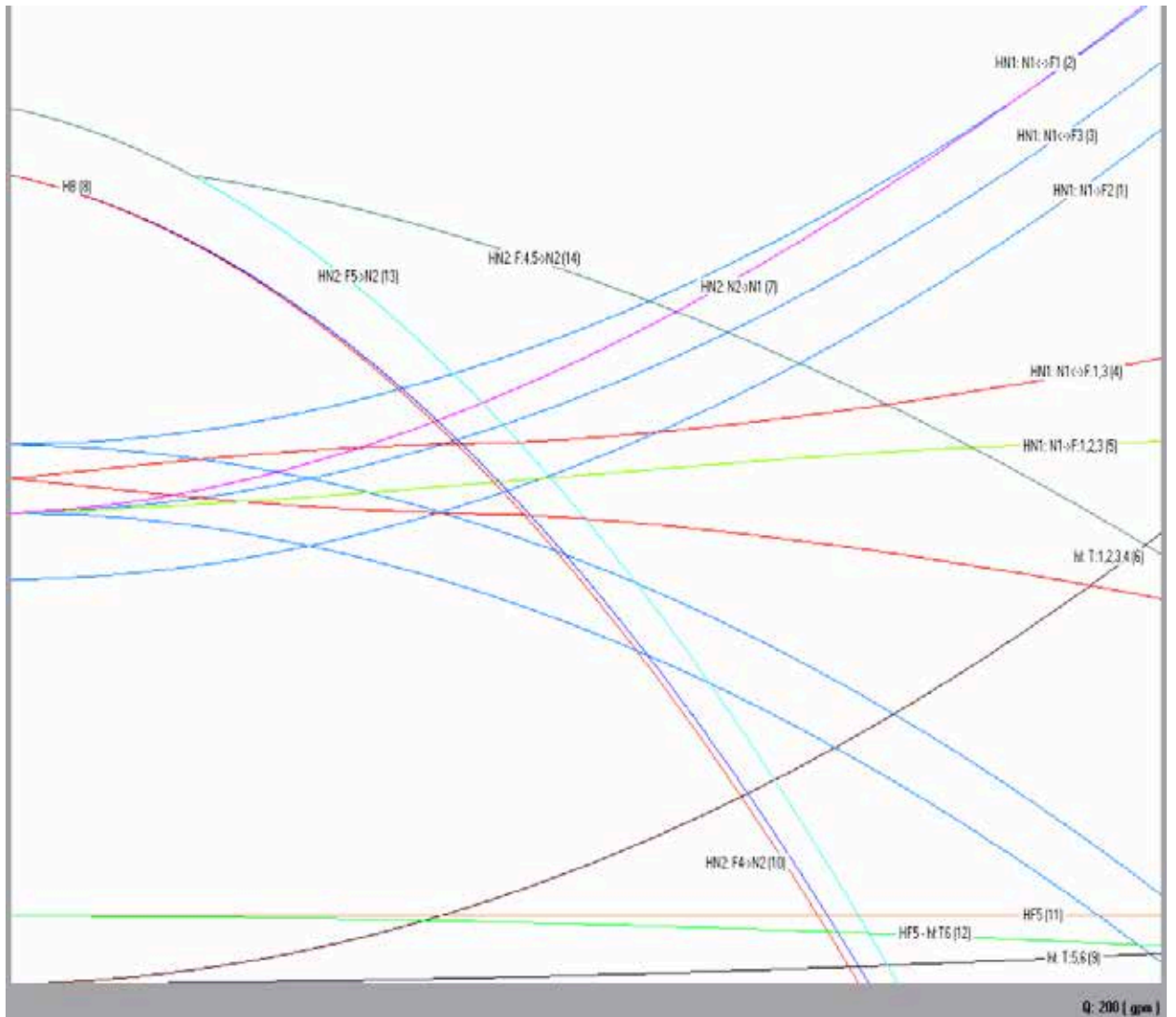


Figura B-1: Resolución por método grafico

Fuente: Leventis (2017)

Resultados del escenario 2

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 1 Fotini		AFT Fathom Model																																																																																																														
<p>General</p> <p>Title: AFT Fathom Model Input File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2.fth Scenario: Base Scenario/Escenario 2</p> <p>Number Of Pipes= 8 Number Of Junctions= 9</p> <p>Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Pressure Relaxation= (Automatic)</p> <p>Constant Fluid Property Model Fluid Database: AFT Standard Fluid: Water at 1 atm Max Fluid Temperature Data= 212 deg. F Min Fluid Temperature Data= 32 deg. F Temperature= 15 deg. C Density= 62.3773 lbm/ft3 Viscosity= 2.76991 lbm/hr-ft Vapor Pressure= 0.24091 psia Viscosity Model= Newtonian Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Control Valve, Spray Discharge, Relief Valve</p> <p>Ambient Pressure (constant)= 1 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300</p> <p>Pipes</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pipe</th> <th>Name</th> <th>Pipe Defined</th> <th>Length</th> <th>Length Units</th> <th>Hydraulic Diameter</th> <th>Hydraulic Diam. Units</th> <th>Friction Data Set</th> <th>Roughness</th> <th>Roughness Units</th> <th>Losses (K)</th> <th>Initial Flow</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>80</td> <td>feet</td> <td>2.067</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>80</td> <td>feet</td> <td>2.067</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>80</td> <td>feet</td> <td>2.067</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>50</td> <td>feet</td> <td>2.067</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>10</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>10</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>40</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>40</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Pipe	Name	Pipe Defined	Length	Length Units	Hydraulic Diameter	Hydraulic Diam. Units	Friction Data Set	Roughness	Roughness Units	Losses (K)	Initial Flow	1	Pipe	Yes	80	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0		2	Pipe	Yes	80	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0		3	Pipe	Yes	80	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0		4	Pipe	Yes	50	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0		5	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		6	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		7	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		8	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0	
Pipe	Name	Pipe Defined	Length	Length Units	Hydraulic Diameter	Hydraulic Diam. Units	Friction Data Set	Roughness	Roughness Units	Losses (K)	Initial Flow																																																																																																					
1	Pipe	Yes	80	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																						
2	Pipe	Yes	80	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																						
3	Pipe	Yes	80	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																						
4	Pipe	Yes	50	feet	2.067	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																						
5	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																						
6	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																						
7	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																						
8	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																						

Figura C-1: Información General del Sistema Escenario 2

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 5 Fotini		AFT Fathom Model																																																				
<p>Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Flow relaxation automatically lowered to 0.01 Pressure Relaxation= (Automatic)</p> <p>Constant Fluid Property Model Fluid Database: AFT Standard Fluid: Water at 1 atm Max Fluid Temperature Data= 212 deg. F Min Fluid Temperature Data= 32 deg. F Temperature= 15 deg. C Density= 62.3773 lbm/ft3 Viscosity= 2.76991 lbm/hr-ft Vapor Pressure= 0.24091 psia Viscosity Model= Newtonian Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Control Valve, Spray Discharge, Relief Valve</p> <p>Ambient Pressure (constant)= 1 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300 Total Inflow= 180.0 gal/min Total Outflow= 180.0 gal/min Maximum Static Pressure is 54.89 psia at Pipe 5 Inlet Minimum Static Pressure is 13.94 psia at Pipe 2 Outlet</p> <p>Warnings</p> <p>No Warnings</p> <p><u>Pump Summary</u></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Jct</th> <th>Results Diagram</th> <th>Name</th> <th>Vol. Flow (gal/min)</th> <th>Mass Flow (lbm/sec)</th> <th>dP (psid)</th> <th>dH (feet)</th> <th>Overall Efficiency (Percent)</th> <th>Speed (Percent)</th> <th>Overall Power (hp)</th> <th>BEP (gal/min)</th> <th>% of BEP (Percent)</th> <th>NPSHA (feet)</th> <th>NPSHR (feet)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8</td> <td>Show ...</td> <td>Pump</td> <td>61.06</td> <td>8.485</td> <td>40.40</td> <td>93.27</td> <td>N/A</td> <td>100.0</td> <td>1.439</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>32.99</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Show ...</td> <td>Pump</td> <td>74.17</td> <td>10.308</td> <td>36.16</td> <td>83.48</td> <td>N/A</td> <td>100.0</td> <td>1.564</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>42.82</td> <td>N/A</td> </tr> </tbody> </table> <p><u>Reservoir Summary</u></p>													Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (gal/min)	Mass Flow (lbm/sec)	dP (psid)	dH (feet)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)	8	Show ...	Pump	61.06	8.485	40.40	93.27	N/A	100.0	1.439	N/A	N/A	32.99	N/A	9	Show ...	Pump	74.17	10.308	36.16	83.48	N/A	100.0	1.564	N/A	N/A	42.82	N/A
Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (gal/min)	Mass Flow (lbm/sec)	dP (psid)	dH (feet)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)																																									
8	Show ...	Pump	61.06	8.485	40.40	93.27	N/A	100.0	1.439	N/A	N/A	32.99	N/A																																									
9	Show ...	Pump	74.17	10.308	36.16	83.48	N/A	100.0	1.564	N/A	N/A	42.82	N/A																																									

Figura C-2: Reporte de bombas Escenario 2

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 6 Fctm1	AFT Fathom Model
---------------------------------------------------	------------------

Jct	Name	Type	Liq. Height (feet)	Liq. Elevation (feet)	Surface Pressure (psia)	Liquid Volume (feet3)	Liquid Mass (lbm)	Net Vol. Flow (gal/min)	Net Mass Flow (lbm/sec)
1	Reservoir	Infinite	N/A	80.00	14.70	N/A	N/A	-44.79	-6.225
2	Reservoir	Infinite	N/A	60.00	14.70	N/A	N/A	110.69	15.383
3	Reservoir	Infinite	N/A	70.00	14.70	N/A	N/A	69.33	9.635
6	Reservoir	Infinite	N/A	0.00	14.70	N/A	N/A	-61.06	-8.485
7	Reservoir	Infinite	N/A	10.00	14.70	N/A	N/A	-74.17	-10.308

Pipe Output Table

Pipe	Name	Vol. Flow Rate (gal/min)	Velocity (feet/sec)	P Static Max (psia)	P Static Min (psia)	Elevation Inlet (feet)	Elevation Outlet (feet)	dP Stag. Total (psid)	dP Static Total (psid)	dP Gravity (psid)	dH (feet)
1	Pipe	44.79	4.282	47.93	14.57	80.00	0.00	-33.35652	-33.35652	-34.654	2.9954
2	Pipe	110.69	10.583	47.30	13.94	0.00	60.00	33.35652	33.35652	25.991	17.0046
3	Pipe	69.33	6.628	47.76	14.40	0.00	70.00	33.35652	33.35652	30.322	7.0046
4	Pipe	135.23	12.929	53.76	46.93	0.00	0.00	6.83740	6.83740	0.000	15.7844
5	Pipe	61.06	2.650	54.89	54.84	0.00	0.00	0.04348	0.04348	0.000	0.1004
6	Pipe	74.17	3.219	54.88	54.82	0.00	0.00	0.06152	0.06152	0.000	0.1420
7	Pipe	61.06	2.650	14.65	14.48	0.00	0.00	0.16632	0.16632	0.000	0.3840
8	Pipe	74.17	3.219	18.72	14.63	10.00	0.00	-4.09350	-4.09350	-4.332	0.5500

Pipe	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Flow Area (feet2)	Hyd. Diameter (Inches)	Pipe Nominal Size	Pipe Material	Roughness	Reynolds No.	Pipe Type-Schedule
1	14.57	47.93	14.70	48.05	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.980E+04	STD (schedule 40)
2	47.30	13.94	48.05	14.70	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.478E+05	STD (schedule 40)
3	47.76	14.40	48.05	14.70	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	9.256E+04	STD (schedule 40)
4	53.76	46.93	54.89	48.05	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.805E+05	STD (schedule 40)
5	54.89	54.84	54.93	54.89	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.492E+04	STD (schedule 40)
6	54.88	54.82	54.95	54.89	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	6.672E+04	STD (schedule 40)
7	14.65	14.48	14.70	14.53	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.492E+04	STD (schedule 40)
8	14.63	18.72	14.70	18.79	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	6.672E+04	STD (schedule 40)

All Junction Table

Jct	Name	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Vol. Flow Rate Thru Jct (gal/min)	Mass Flow Rate Thru Jct (lbm/sec)	Loss Factor (K)
1	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	44.79	6.225	0
2	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	110.69	15.383	0
3	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	69.33	9.635	0
4	Branch	47.55	47.55	48.05	48.05	N/A	N/A	0
5	Branch	54.63	54.63	54.89	54.89	N/A	N/A	0
6	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	61.06	8.485	0

Figura C-3: Reporte de tuberías y Nodos Escenario 2

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Resultados del escenario 3

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 1 Fotini		AFT Fathom Model																																																																																																													
<p>General</p> <p>Title: AFT Fathom Model Input File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2.fth Scenario: Base Scenario/Escenario 3</p> <p>Number Of Pipes= 8 Number Of Junctions= 9</p> <p>Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Pressure Relaxation= (Automatic)</p> <p>Constant Fluid Property Model Fluid Database: AFT Standard Fluid: Water at 1 atm Max Fluid Temperature Data= 212 deg. F Min Fluid Temperature Data= 32 deg. F Temperature= 15 deg. C Density= 62.3773 lbm/ft3 Viscosity= 2.76991 lbm/hr-ft Vapor Pressure= 0.24091 psia Viscosity Model= Newtonian</p> <p>Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Control Valve, Spray Discharge, Relief Valve</p> <p>Ambient Pressure (constant)= 1 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300</p> <p>Pipes</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pipe</th> <th>Name</th> <th>Pipe Defined</th> <th>Length</th> <th>Length Units</th> <th>Hydraulic Diameter</th> <th>Hydraulic Diam. Units</th> <th>Friction Data Set</th> <th>Roughness</th> <th>Roughness Units</th> <th>Losses (K)</th> <th>Initial Flow</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>100</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>100</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>100</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>100</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>10</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>10</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>40</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Pipe</td> <td>Yes</td> <td>40</td> <td>feet</td> <td>3.068</td> <td>inches</td> <td>Standard</td> <td>0.0018</td> <td>inches</td> <td>0</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Pipe	Name	Pipe Defined	Length	Length Units	Hydraulic Diameter	Hydraulic Diam. Units	Friction Data Set	Roughness	Roughness Units	Losses (K)	Initial Flow	1	Pipe	Yes	100	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		2	Pipe	Yes	100	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		3	Pipe	Yes	100	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		4	Pipe	Yes	100	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		5	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		6	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		7	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0		8	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0	
Pipe	Name	Pipe Defined	Length	Length Units	Hydraulic Diameter	Hydraulic Diam. Units	Friction Data Set	Roughness	Roughness Units	Losses (K)	Initial Flow																																																																																																				
1	Pipe	Yes	100	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																					
2	Pipe	Yes	100	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																					
3	Pipe	Yes	100	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																					
4	Pipe	Yes	100	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																					
5	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																					
6	Pipe	Yes	10	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																					
7	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																					
8	Pipe	Yes	40	feet	3.068	inches	Standard	0.0018	inches	0																																																																																																					

Figura C-4: Información general del sistema escenario 3

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 5 Fotini	AFT Fathom Model																																											
<p> Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Flow relaxation automatically lowered to 0.01 Pressure Relaxation= (Automatic) </p> <p> Constant Fluid Property Model Fluid Database: AFT Standard Fluid: Water at 1 atm Max Fluid Temperature Data= 212 deg. F Min Fluid Temperature Data= 32 deg. F Temperature= 15 deg. C Density= 62.3773 lbm/ft3 Viscosity= 2.76991 lbm/hr-ft Vapor Pressure= 0.24091 psia Viscosity Model= Newtonian Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Control Valve, Spray Discharge, Relief Valve </p> <p> Ambient Pressure (constant)= 1 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300 Total Inflow= 348.0 gal/min Total Outflow= 348.0 gal/min Maximum Static Pressure is 49.01 psia at Pipe 5 Inlet Minimum Static Pressure is 13.96 psia at Pipe 2 Outlet </p> <p> <u>Warnings</u> No Warnings </p> <p> <u>Pump Summary</u> </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Jct</th> <th>Results Diagram</th> <th>Name</th> <th>Vol. Flow (gal/min)</th> <th>Mass Flow (lbm/sec)</th> <th>dP (psid)</th> <th>dH (feet)</th> <th>Overall Efficiency (Percent)</th> <th>Speed (Percent)</th> <th>Overall Power (hp)</th> <th>BEP (gal/min)</th> <th>% of BEP (Percent)</th> <th>NPSHA (feet)</th> <th>NPSHR (feet)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8</td> <td>Show ...</td> <td>Pump</td> <td>78.41</td> <td>10.90</td> <td>34.66</td> <td>80.01</td> <td>N/A</td> <td>100.0</td> <td>1.585</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>32.76</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>Show ...</td> <td>Pump</td> <td>89.50</td> <td>12.44</td> <td>30.42</td> <td>70.22</td> <td>N/A</td> <td>100.0</td> <td>1.588</td> <td>N/A</td> <td>N/A</td> <td>42.59</td> <td>N/A</td> </tr> </tbody> </table> <p> <u>Reservoir Summary</u> </p>			Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (gal/min)	Mass Flow (lbm/sec)	dP (psid)	dH (feet)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)	8	Show ...	Pump	78.41	10.90	34.66	80.01	N/A	100.0	1.585	N/A	N/A	32.76	N/A	9	Show ...	Pump	89.50	12.44	30.42	70.22	N/A	100.0	1.588	N/A	N/A	42.59	N/A
Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (gal/min)	Mass Flow (lbm/sec)	dP (psid)	dH (feet)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)																															
8	Show ...	Pump	78.41	10.90	34.66	80.01	N/A	100.0	1.585	N/A	N/A	32.76	N/A																															
9	Show ...	Pump	89.50	12.44	30.42	70.22	N/A	100.0	1.588	N/A	N/A	42.59	N/A																															

Figura C-5: Reporte de bombas escenario 3

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 6 Fotini	AFT Fathom Model
----------------------------------------------------	------------------

Jct	Name	Type	Liq. Height (feet)	Liq. Elevation (feet)	Surface Pressure (psia)	Liquid Volume (feet ³)	Liquid Mass (lbm)	Net Vol. Flow (gal/min)	Net Mass Flow (lbm/sec)
1	Reservoir	Infinite	N/A	80.00	14.70	N/A	N/A	-180.08	-25.03
2	Reservoir	Infinite	N/A	60.00	14.70	N/A	N/A	241.09	33.51
3	Reservoir	Infinite	N/A	70.00	14.70	N/A	N/A	106.90	14.86
6	Reservoir	Infinite	N/A	0.00	14.70	N/A	N/A	-78.41	-10.90
7	Reservoir	Infinite	N/A	10.00	14.70	N/A	N/A	-89.50	-12.44

Pipe Output Table

Pipe	Name	Vol. Flow Rate (gal/min)	Velocity (feet/sec)	P Static Max (psia)	P Static Min (psia)	Elevation Inlet (feet)	Elevation Outlet (feet)	dP Stag. Total (psid)	dP Static Total (psid)	dP Gravity (psid)	dH (feet)
1	Pipe	180.08	7.815	45.80	14.28	80.00	0.00	-31.51497	-31.51497	-34.654	7.2467
2	Pipe	241.09	10.463	45.47	13.96	0.00	60.00	31.51498	31.51498	25.991	12.7533
3	Pipe	106.90	4.639	46.07	14.55	0.00	70.00	31.51498	31.51498	30.322	2.7533
4	Pipe	167.91	7.287	48.66	45.85	0.00	0.00	2.80813	2.80813	0.000	6.4827
5	Pipe	78.41	3.403	49.01	48.94	0.00	0.00	0.06967	0.06967	0.000	0.1608
6	Pipe	89.50	3.884	49.01	48.92	0.00	0.00	0.08814	0.08814	0.000	0.2035
7	Pipe	78.41	3.403	14.62	14.35	0.00	0.00	0.26414	0.26414	0.000	0.6098
8	Pipe	89.50	3.884	18.59	14.59	10.00	0.00	-3.99396	-3.99396	-4.332	0.7798

Pipe	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Flow Area (feet ²)	Hyd. Diameter (inches)	Pipe Nominal Size	Pipe Material	Roughness	Reynolds No.	Pipe Type-Schedule
1	14.28	45.80	14.70	46.21	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.620E+05	STD (schedule 40)
2	45.47	13.96	46.21	14.70	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	2.169E+05	STD (schedule 40)
3	46.07	14.55	46.21	14.70	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	9.616E+04	STD (schedule 40)
4	48.66	45.85	49.02	46.21	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.510E+05	STD (schedule 40)
5	49.01	48.94	49.09	49.02	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	7.053E+04	STD (schedule 40)
6	49.01	48.92	49.11	49.02	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	8.050E+04	STD (schedule 40)
7	14.62	14.35	14.70	14.43	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	7.053E+04	STD (schedule 40)
8	14.59	18.59	14.70	18.69	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	8.050E+04	STD (schedule 40)

All Junction Table

Jct	Name	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Vol. Flow Rate Thru Jct (gal/min)	Mass Flow Rate Thru Jct (lbm/sec)	Loss Factor (K)
1	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	180.08	25.03	0
2	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	241.09	33.51	0
3	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	106.90	14.86	0
4	Branch	45.83	45.83	46.21	46.21	N/A	N/A	0
5	Branch	48.86	48.86	49.02	49.02	N/A	N/A	0
6	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	78.41	10.90	0

Figura C-6: Reporte de tuberías y Nodos escenario 3

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Resultado del escenario 4

<p>Fathom 9 (Output) 10/16/2017 Page 1 Fotini</p>	<p>AFT Fathom Model</p>	
<p>Model Reference Information</p> <p><u>General</u></p> <p>Title: AFT Fathom Model Analysis run on: 10/9/2017 3:31:26 AM Application version: AFT Fathom Version 9 (2015.09.01) Input File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2.fth Scenario: Base Scenario/Escenario 4 Output File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2_4.out</p> <p>Execution Time= 1.29 seconds Total Number Of Head/Pressure Iterations= 5696 Total Number Of Flow Iterations= 356 Total Number Of Temperature Iterations= 0 Number Of Pipes= 8 Number Of Junctions= 9 Matrix Method= Gaussian Elimination</p> <p>Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Flow relaxation automatically lowered to 0.01 Pressure Relaxation= (Automatic)</p> <p>Constant Fluid Property Model Fluid Database: AFT Standard Fluid: Water at 1 atm Max Fluid Temperature Data= 212 deg. F Min Fluid Temperature Data= 32 deg. F Temperature= 15 deg. C Density= 62.3773 lbm/ft³ Viscosity= 2.76991 lbm/hr-ft Vapor Pressure= 0.24091 psia Viscosity Model= Newtonian</p> <p>Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Control Valve, Spray Discharge, Relief Valve</p> <p>Ambient Pressure (constant)= 1 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300 Total Inflow= 227.7 gal/min Total Outflow= 227.7 gal/min Maximum Static Pressure is 58.20 psia at Pipe 5 Inlet Minimum Static Pressure is 13.70 psia at Pipe 3 Outlet</p> <p><u>Warnings</u></p> <p>No Warnings</p>		

Figura C-7: Información general del sistema escenario 4

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/16/2017 Page 2 Fotini				AFT Fathom Model										
Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (gal/min)	Mass Flow (lbm/sec)	dP (psid)	dH (feet)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)	
8	Show	...	Pump	49.43	6.870	43.64	100.75	N/A	100.0	1.258	N/A	N/A	33.11	N/A
9	Show	...	Pump	64.34	8.941	39.40	90.96	N/A	100.0	1.478	N/A	N/A	42.95	N/A

Reservoir Summary

Jct	Name	Type	Liq. Height (feet)	Liq. Elevation (feet)	Surface Pressure (psia)	Liquid Volume (feet3)	Liquid Mass (lbm)	Net Vol. Flow (gal/min)	Net Mass Flow (lbm/sec)
1	Reservoir	Infinite	N/A	100.00	14.70	N/A	N/A	-113.89	-15.828
2	Reservoir	Infinite	N/A	60.00	14.70	N/A	N/A	100.57	13.977
3	Reservoir	Infinite	N/A	50.00	14.70	N/A	N/A	127.09	17.662
6	Reservoir	Infinite	N/A	0.00	14.70	N/A	N/A	-49.43	-6.870
7	Reservoir	Infinite	N/A	10.00	14.70	N/A	N/A	-64.34	-8.941

Solution Balance Summary

Jct	Connected Pipes	Mass Flow (lbm/sec)
1 (Reservoir)	1	-15.83
	TOTAL	-15.83
2 (Reservoir)	2	13.98
	TOTAL	13.98
3 (Reservoir)	3	17.66
	TOTAL	17.66
4 (Branch)	1	15.83
	2	-13.98
	3	-17.66
	4	15.81
	TOTAL	0.000
5 (Branch)	4	-15.81
	5	6.870
	6	8.941
	TOTAL	-8.917E-05
6 (Reservoir)	7	-6.870
	TOTAL	-6.870
7 (Reservoir)	8	-8.941
	TOTAL	-8.941
8 (Pump)	7	6.870
	5	-6.870

Figura C-8: Reporte de bombas y tanques escenario 4

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/16/2017 Page 3 Fotini			AFT Fathom Model								
Jct	Connected Pipes	Mass Flow (lbm/sec)									
	TOTAL	0.000									
9 (Pump)	8	8.941									
	6	-8.941									
	TOTAL	0.000									
Pipe Output Table											
Pipe	Name	Vol. Flow Rate (gal/min)	Velocity (feet/sec)	P Static Max (psia)	P Static Min (psia)	Elevation Inlet (feet)	Elevation Outlet (feet)	dP Stag Total (psid)	dP Static Total (psid)	dP Gravity (psid)	dH (feet)
1	Pipe	113.89	10.889	47.57	13.90	100.00	0.00	-33.67654	-33.67654	-43.318	22.25662
2	Pipe	100.57	9.616	47.75	14.07	0.00	60.00	33.67654	33.67654	25.991	17.74338
3	Pipe	127.09	12.151	47.38	13.70	0.00	50.00	33.67654	33.67654	21.659	27.74338
4	Pipe	113.77	10.878	57.40	47.58	0.00	0.00	9.82522	9.82522	0.000	22.68184
5	Pipe	49.43	2.145	58.20	58.17	0.00	0.00	0.02975	0.02975	0.000	0.06868
6	Pipe	64.34	2.792	58.19	58.15	0.00	0.00	0.04741	0.04741	0.000	0.10945
7	Pipe	49.43	2.145	14.66	14.55	0.00	0.00	0.11288	0.11288	0.000	0.26058
8	Pipe	64.34	2.792	18.79	14.64	10.00	0.00	-4.14859	-4.14859	-4.332	0.42285
Pipe	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Flow Area (feet ²)	Hyd. Diameter (inches)	Pipe Nominal Size	Pipe Material	Roughness	Reynolds No.	
1	13.90	47.57	14.70	48.37	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.521E+05	
2	47.75	14.07	48.37	14.70	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.343E+05	
3	47.38	13.70	48.37	14.70	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.697E+05	
4	57.40	47.58	58.20	48.37	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.519E+05	
5	58.20	58.17	58.23	58.20	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	4.447E+04	
6	58.19	58.15	58.25	58.20	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.787E+04	
7	14.66	14.55	14.70	14.58	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	4.447E+04	
8	14.64	18.79	14.70	18.84	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.787E+04	
Pipe	Pipe Type-Schedule	f	K								
1	STD (schedule 40)	0.02091	0								
2	STD (schedule 40)	0.02113	0								
3	STD (schedule 40)	0.02074	0								
4	STD (schedule 40)	0.02092	0								
5	STD (schedule 40)	0.02328	0								
6	STD (schedule 40)	0.02231	0								
7	STD (schedule 40)	0.02328	0								
8	STD (schedule 40)	0.02231	0								

Figura C-9: Reporte de tuberías escenario 4

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/16/2017 Page 4 Fotini		AFT Fathom Model						
Jct	Name	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Vol. Flow Rate Thru Jct (gal/min)	Mass Flow Rate Thru Jct (lbm/sec)	Loss Factor (K)
1	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	113.89	15.828	0
2	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	100.57	13.977	0
3	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	127.09	17.662	0
4	Branch	47.58	47.58	48.37	48.37	N/A	N/A	0
5	Branch	58.01	58.01	58.20	58.20	N/A	N/A	0
6	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	49.43	6.870	0
7	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	64.34	8.941	0
8	Pump	14.55	58.20	14.58	58.23	49.43	6.870	0
9	Pump	18.79	58.19	18.84	58.25	64.34	8.941	0

Figura C-10: Reporte de nodos escenario 4

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Resultados del Escenario 5

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 1 Fotini	AFT Fathom Model	
<p><u>General</u></p> <p>Title: AFT Fathom Model Analysis run on: 10/9/2017 4:08:41 AM Application version: AFT Fathom Version 9 (2015.09.01) Input File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2.fth Scenario: Base Scenario/Escenario 5 Output File: C:\AFT Products\AFT Fathom 9\Problema 2_5.out</p> <p>Execution Time= 1.25 seconds Total Number Of Head/Pressure Iterations= 6002 Total Number Of Flow Iterations= 355 Total Number Of Temperature Iterations= 0 Number Of Pipes= 8 Number Of Junctions= 9 Matrix Method= Gaussian Elimination</p> <p>Pressure/Head Tolerance= 0.0001 relative change Flow Rate Tolerance= 0.0001 relative change Temperature Tolerance= 0.0001 relative change Flow Relaxation= (Automatic) Flow relaxation automatically lowered to 0.05 Pressure Relaxation= (Automatic)</p> <p>Constant Fluid Property Model Fluid Database: AFT Standard Fluid: Water at 1 atm Max Fluid Temperature Data= 212 deg. F Min Fluid Temperature Data= 32 deg. F Temperature= 15 deg. C Density= 62.3773 lbm/ft3 Viscosity= 2.76991 lbm/hr-ft Vapor Pressure= 0.24091 psia Viscosity Model= Newtonian Apply laminar and non-Newtonian correction to: Pipe Fittings & Losses, Junction K factors, Junction Special Losses, Junction Polynomials Corrections applied to the following junctions: Branch, Reservoir, Assigned Flow, Assigned Pressure, Area Change, Bend, Tee or Wye, Control Valve, Spray Discharge, Relief Valve</p> <p>Ambient Pressure (constant)= 1 atm Gravitational Acceleration= 1 g Turbulent Flow Above Reynolds Number= 4000 Laminar Flow Below Reynolds Number= 2300 Total Inflow= 150.1 gal/min Total Outflow= 150.1 gal/min Maximum Static Pressure is 58.68 psia at Pipe 6 Inlet Minimum Static Pressure is 14.17 psia at Pipe 2 Outlet</p>		

Figura C-11: Información general del sistema escenario 5

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 3 Fotini			AFT Fathom Model										
Pump Summary													
Jct	Results Diagram	Name	Vol. Flow (gal/min)	Mass Flow (lbm/sec)	dP (psid)	dH (feet)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)
8	Show ...	Pump	47.52	6.604	44.13	101.88	N/A	100.0	1.223	N/A	N/A	33.09	N/A
9	Show ...	Pump	62.71	8.716	39.90	92.12	N/A	100.0	1.459	N/A	N/A	42.91	N/A

Figura C-12: Reporte de bombas escenario 5

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 4 Fotini				AFT Fathom Model					
Reservoir Summary									
Jct	Name	Type	Liq. Height (feet)	Liq. Elevation (feet)	Surface Pressure (psia)	Liquid Volume (feet3)	Liquid Mass (lbm)	Net Vol. Flow (gal/min)	Net Mass Flow (lbm/sec)
1	Reservoir	Infinite	N/A	80.00	14.70	N/A	N/A	-39.88	-5.542
2	Reservoir	Infinite	N/A	60.00	14.70	N/A	N/A	92.73	12.888
3	Reservoir	Infinite	N/A	70.00	14.70	N/A	N/A	57.38	7.974
6	Reservoir	Infinite	N/A	0.00	14.70	N/A	N/A	-47.52	-6.604
7	Reservoir	Infinite	N/A	10.00	14.70	N/A	N/A	-62.71	-8.716

Figura C-13: Reporte de tanques escenario 5

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 5 Fotini				AFT Fathom Model							
Pipe Output Table											
Pipe	Name	Vol. Flow Rate (gal/min)	Velocity (feet/sec)	P Static Max (psia)	P Static Min (psia)	Elevation Inlet (feet)	Elevation Outlet (feet)	dP Stag. Total (psid)	dP Static Total (psid)	dP Gravity (psid)	dH (feet)
1	Pipe	39.88	3.813	47.82	14.60	80.00	0.00	-33.21910	-33.21910	-34.654	3.31263
2	Pipe	92.73	8.866	47.39	14.17	0.00	60.00	33.21910	33.21910	25.991	16.68737
3	Pipe	57.38	5.486	47.71	14.49	0.00	70.00	33.21910	33.21910	30.322	6.68737
4	Pipe	110.24	10.540	57.93	47.17	0.00	0.00	10.75790	10.75790	0.000	24.83497
5	Pipe	47.52	2.062	58.68	58.64	0.00	0.00	0.03492	0.03492	0.000	0.08060
6	Pipe	62.71	2.722	58.68	58.62	0.00	0.00	0.05710	0.05710	0.000	0.13181
7	Pipe	47.52	2.062	14.67	14.55	0.00	0.00	0.11933	0.11933	0.000	0.27548
8	Pipe	62.71	2.722	18.78	14.65	10.00	0.00	-4.13209	-4.13209	-4.332	0.46093
Pipe	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Flow Area (feet2)	Hyd. Diameter (inches)	Pipe Nominal Size	Pipe Material	Roughness	Reynolds No.	
1	14.60	47.82	14.70	47.92	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.324E+04	
2	47.39	14.17	47.92	14.70	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.238E+05	
3	47.71	14.49	47.92	14.70	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	7.661E+04	
4	57.93	47.17	58.67	47.92	0.02330	2.067	2 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	1.472E+05	
5	58.68	58.64	58.71	58.67	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	4.275E+04	
6	58.68	58.62	58.73	58.67	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.641E+04	
7	14.67	14.55	14.70	14.58	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	4.275E+04	
8	14.65	18.78	14.70	18.83	0.05134	3.068	3 inch	Steel - ANSI	0.0018 inches	5.641E+04	
Pipe	Pipe Type-Schedule	K	f								
1	STD (schedule 40)	1.0660	0.02345								
2	STD (schedule 40)	1.3019	0.02128								
3	STD (schedule 40)	1.3019	0.02237								
4	STD (schedule 40)	2.2000	0.02097								
5	STD (schedule 40)	0.2869	0.02344								
6	STD (schedule 40)	0.2869	0.02240								
7	STD (schedule 40)	0.5000	0.02344								
8	STD (schedule 40)	0.5000	0.02240								

Figura C-14: Reporte de tuberías escenario 5

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)

Fathom 9 (Output) 10/9/2017 Page 6 Fotini		AFT Fathom Model						
All Junction Table								
Jct	Name	P Static In (psia)	P Static Out (psia)	P Stag. In (psia)	P Stag. Out (psia)	Vol. Flow Rate Thru Jct (gal/min)	Mass Flow Rate Thru Jct (lbm/sec)	Loss Factor (K)
1	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	39.88	5.542	0
2	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	92.73	12.888	0
3	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	57.38	7.974	0
4	Branch	47.57	47.57	47.92	47.92	N/A	N/A	0
5	Branch	58.50	58.50	58.67	58.67	N/A	N/A	0
6	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	47.52	6.604	0
7	Reservoir	14.70	14.70	14.70	14.70	62.71	8.716	0
8	Pump	14.55	58.68	14.58	58.71	47.52	6.604	0
9	Pump	18.78	58.68	18.83	58.73	62.71	8.716	0

Figura C-15: Reporte de nodos escenario 5

Fuente: AFT Fathom 9 (2017)