

Universidad de Matanzas Sede "Camilo Cienfuegos"

Facultad de Ciencias Técnicas

Departamento de Química e Ingeniería Química



TRABAJO DE DIPLOMA

**Título: Diseño de la infraestructura
de transporte del agua residual
de la EPEP Centro**

Autor: Claudia García González

Tutores: Dr.C Lourdes Y. González Sáez

M.Sc. Carlos A. González Hernández

Matanzas, 2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Calificación

Ciudad, fecha

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Claudia García González declaro que soy la única autora del presente trabajo y autorizo a la Universidad de Matanzas y a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP Centro), a que hagan uso parcial o total del mismo, con la finalidad que estimen conveniente.

Nombre y Apellidos

Firma

P E N S A M I E N T O

“La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos...”

Albert Einstein

DEDICATORIA

A mis padres Rolindes y Nelson porque son la luz de mi vida.

A mi hermano Nelsito, porque solo el hecho de existir, me hace feliz.

A mis tutores Lourdes y Carlos por su dedicación.

A mi magnífico claustro de profesores, por su sabiduría y experiencia.

A mis abuelos mima, pipo y Mario.

A mis primos Deliannis, Joanna y Joan porque son mis hermanos también.

A mi familia y amigos en general por su apoyo.

AGRADECIMIENTOS

La palabra imposible carece de sentido siempre que hayan personas dispuestas a ayudarte e indicarte el camino a seguir para lograr un objetivo. Por eso esta página es importante para mí. La ocasión existe y quiero aprovechar el momento para dar mis más sentidos agradecimientos:

A mis padres y mi hermano, por inspirarme con su ejemplo, por su apoyo, ayuda y sacrificio.

A mis tutores por su esfuerzo, tiempo y dedicación.

A todos mis profesores, que de una manera u otra han influido tanto en mi formación profesional como personal.

A los trabajadores de la EPEP Centro, en especial a Mariela, Juan José, Liz, Ana Gloria, Esmeralda y Renier y al resto del departamento de tecnología.

A mis excelentes compañeros de clase y amigos Ivis, Naidy y Alejandro, porque con nuestras diferencias hacemos un gran equipo.

A Iraida, Ernesto, Nesti y Robe, por estar conmigo en los buenos y malos momentos, pero sobre todo en los malos, por su apoyo, cariño y ayuda incondicional.

A mi tío William y a toda mi familia por estar presentes en todas las etapas de mi vida.

Y a todos mis compañeros de clase por haber compartido conmigo estos cinco maravillosos años.

También doy gracias a los que me han dicho "no" porque gracias a ellos lo he hecho yo misma.

A todos... Muchas Gracias!!!

R E S U M E N

Este trabajo se realiza en la Bateria Central perteneciente a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP Centro), con el objetivo de diseñar el sistema de flujo de la infraestructura de transporte de las aguas residuales de dicha Empresa. Para ello se realiza un análisis bibliográfico, el cual constituye la base teórica de este proyecto. Para evaluar el sistema de flujo objeto de estudio, inicialmente se realiza el levantamiento físico de la infraestructura de transporte, lo cual permite definir los parámetros técnicos-operacionales del mismo. Para establecer los parámetros de diseño adecuados que garanticen los requerimientos tecnológicos del proceso, se lleva a cabo la modelación y simulación de la red hidráulica mediante un software simulador de flujo. Con la simulación se definen los parámetros idóneos que posibiliten rediseñar el sistema de flujo de la infraestructura de transporte de las aguas residuales de la EPEP Centro. En el diseño se propone homogenizar el sistema de tuberías con un diámetro de 10" y utilizar el policloruro de vinilo (PVC) como material de la misma. Se valida la factibilidad económica de la propuesta, con el objetivo de disminuir los costos de inversión y mantenimiento. El cálculo de la relación beneficio-costos corrobora el análisis económico realizado.

A B S T R A C T

This work is carried out in the Central Battery belonging to the Company of Perforation and Extraction of Petroleum of the Center (EPEP Center), with the objective of evaluating the system of flow of the infrastructure of transport of the residual waters of this Company. For it is carried out it a bibliographical analysis, which constitutes the theoretical base of this project. To evaluate the system of flow study object, initially it will be carried out the physical rising of the infrastructure of transport, that which will facilitate to define the technician-operational parameters of the same one. The adapted design parameters that guarantee the technological requirements of the process, to settle down it will be carried out the modelation and simulation of the hydraulic net by means of a software pretender of flow. With the simulation they will be defined the suitable parameters that facilitate to redraw the system of flow of the infrastructure of transport of the residual waters of the EPEP Center. In the design the homogenize proposes the piping system with a diameter of 10" and utilizing the polyvinyl chloride (PVC) as material of the same. The feasibility cheap to run of the proposal for the sake of decreasing the historical costs and maintenance becomes validated. The calculation of the relation I benefit cost he corroborates the realized economic analysis.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción...	1
Capítulo 1. Análisis Bibliográfico...	4
1.1 Tratamiento y disposición del agua residual en la Industria Petrolera...	4
1.2 Transporte y mecánica de los fluidos...	5
1.2.1 Conservación de la masa...	6
1.2.2 Conservación de la energía...	7
1.2.3 Conservación de cantidad de movimiento...	8
1.3 Parámetros de operación y diseño en un sistema de tuberías...	9
1.3.1 Presión de diseño...	11
1.3.2 Temperatura de diseño...	11
1.3.3 Selección de materiales...	11
1.3.4 Corrosión en sistemas de conducción de agua...	14
1.3.5 Diámetro de las tuberías...	14
1.3.6 Disposición de las tuberías...	15
1.3.7 Análisis de flexibilidad...	15
1.3.8 Equipos de bombeo...	16
1.3.9 Válvulas y accesorios...	16
1.4 Modelación y simulación en sistemas de Ingeniería Química...	17
1.4.1 Software para la simulación de procesos químicos. Aplicaciones	19
1.5 Evaluación técnica - económica de procesos...	21
1.5.1 Estudio de Factibilidad...	22
Conclusiones parciales del capítulo...	24
Capítulo 2. Materiales y métodos...	25
2.1 Descripción tecnológica del proceso...	25
2.1.1 Levantamiento físico del ducto y caracterización de los parámetros técnicos – operacionales...	29
2.2 Obtención del modelo de simulación...	31
2.2.1 Selección de la correlación de flujo...	31
2.2.2 Datos del perfil topográfico...	31
2.2.3 Validación del modelo de simulación...	33

2.2.3.1	Análisis estadístico de los datos...	33
2.2.3.2	Ajuste al caso base...	34
2.2.3.3	Análisis de sensibilidad...	35
2.3	Diseño del sistema de flujo...	36
2.3.1	Evaluación del sistema...	36
2.3.1.1	Sistema actual...	36
2.3.1.2	Sistema propuesto...	40
2.3.2	Selección del diámetro de tubería adecuado...	42
2.4	Análisis de factibilidad económica...	43
2.4.1	Sistema de flujo actual...	43
2.4.2	Sistema de flujo propuesto...	44
2.4.3	Relación Beneficio – Costo...	45
Capítulo 3.	Análisis de resultados...	46
3.1	Parámetros y características de la infraestructura de transporte del agua residual de la EPEP Centro...	46
3.1.1	Características físicas del ducto...	46
3.1.2	Parámetros operacionales...	48
3.2	Simulación del sistema de flujo y validación del modelo...	49
3.2.1	Perfil topográfico de la tubería...	49
3.2.2	Análisis estadístico de los datos...	51
3.2.3	Ajuste al caso base...	52
3.2.4	Análisis de sensibilidad...	54
3.3	Evaluación del sistema de flujo actual...	56
3.4	Diseño del sistema de flujo propuesto...	60
3.4.1	Análisis y selección de materiales...	60
3.4.2	Evaluación de los sistemas propuestos...	62
3.4.3	Diámetro de tubería adecuado...	66
3.5	Evaluación económica...	68
3.5.1	Sistema de flujo actual...	68
3.5.2	Sistema de flujo propuesto...	69
3.5.3	Análisis de factibilidad económica...	71

Conclusiones	72
Recomendaciones	73
Bibliografía	74
Anexos	

INTRODUCCIÓN

Dos de los grandes problemas que la industria petrolera enfrenta son, por un lado, la baja eficiencia en la extracción del petróleo de sus reservorios naturales y por el otro, la contaminación que ella misma produce (Raiger y López, 2009).

El petróleo desde hace algunos años ha venido jugando un rol de vital importancia tanto en el mundo como en el país, debido a su aplicación en amplias fuentes de empleo, entre las cuales se encuentran la generación eléctrica, usándose en la actualidad crudo nacional en más del 90% de las termo-eléctricas nacionales. Además, se emplea crudo nacional en fábricas de cemento. Algunos subproductos del mismo tienen también su fuente de empleo, como es el caso del gas natural acompañante y el azufre. Un porcentaje elevado de este crudo es refinable, por lo que cada gota de petróleo extraída y tratada es de vital importancia para el país.

El proceso de producción de petróleo crudo comprende desde la puesta en explotación de los pozos hasta la venta de petróleo en condiciones de calidad. En Cuba los parámetros de calidad de venta del petróleo crudo están definidos por la presencia de 1,5 % de agua y sedimentos, un valor máximo de 850 mg/L en contenido de sales, además de una viscosidad de 1500 cSt. En la medida en que se explotan los yacimientos de petróleo, la concentración de agua de formación asociada al crudo aumenta, llegando a alcanzar valores superiores al 50%, posibilitando las formaciones de emulsiones de agua y petróleo que se forman en el propio proceso de extracción y transportación, las cuales son agravadas por emulsionantes naturales presentes en el fluido (Morín, 2008).

La Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro, fue creada en 1976 y se encuentra ubicada en la Finca "La Cachurra", poblado de Guásimas, municipio de Cárdenas, en la provincia de Matanzas. Esta Empresa posee varios yacimientos ubicados en las provincias centrales del país. En la misma se producen alrededor de 1 millón de toneladas de petróleo y 438 millones de metros cúbicos de gas al año.

El tratamiento del crudo comienza desde los Centros Colectores, mezclándolo con solventes reductores de viscosidad, por ejemplo: nafta, diesel y petróleo ligero; esta dosificación tiene como objetivo facilitar la transportación por oleoductos

magistrales disminuyendo la viscosidad del crudo, y con sustancias tensoactivas, las cuales tienen la función de garantizar la ruptura de la emulsión agua en petróleo, estación final de tratamiento.

La Batería Central de dicha Empresa, tiene la función de garantizar el tratamiento termo-químico final del crudo, eliminando el agua emulsionada y parte de las sales hasta los parámetros de calidad establecidos para la venta.

El ciclo tecnológico de tratamiento está compuesto por: un calentamiento inicial hasta 85°C, la separación secundaria de los gases presentes en el crudo que no han sido separados en los Centros Colectores por equilibrio termodinámico y luego tiene lugar el tratamiento en tanques estáticos, los cuales son los encargados de garantizar las condiciones para lograr que todo el petróleo crudo que se extrae de los distintos yacimientos de la EPEP-Centro, alcance la calidad requerida. En los mismos interactúan un gran grupo de variables claves, como son: la temperatura máxima de tratamiento, el nivel de líquido en el tanque, la viscosidad cinemática, la densidad, el grado y estabilidad de la emulsión en la mezcla, el tipo de solvente que se utilice y su dosificación, así como la sustancia demulsificante empleada, entre otras. En el tratamiento es muy importante la sustancia tensoactiva que se establezca, así como las dosificaciones que se realicen, pues la formulación y buen funcionamiento de las mismas dependen en gran medida de las características del crudo que se vaya a tratar. Cada formulación es probada a escala de laboratorio para luego establecerse a escala industrial (EPEP Centro, 2013).

El agua separada en el Proceso de Tratamiento del Petróleo, una vez tratada era inyectada en pozos de inyección cercanos a la propia Batería Central. A partir de la incorporación del Oleoducto Magistral Varadero – Matanzas, se decide reordenar la inyección de agua residual del proceso de producción de petróleo de la EPEP Centro, hacia la Batería de Cárdenas, convirtiendo el oleoducto existente en acueducto.

La modificación antes expuesta, ha provocado que debido al proceso de corrosión de las tuberías incrementado por las propiedades del agua, se reemplacen de forma paulatina intervalos de la misma.

Esta operación se ha llevado a cabo sin una fundamentación técnica que satisfaga los requerimientos del transporte del agua por el mismo, ya que se desconoce el diámetro de tubería necesario en el proceso (EPEP Centro, 2014).

A partir de los planteamientos anteriores, este trabajo se encuentra orientado hacia el siguiente problema científico:

Problema: La infraestructura de transporte de agua residual de la EPEP Centro, no presenta un diseño adecuado debido a que la misma está conformada por una gran variedad de diámetros.

Hipótesis: La obtención de un modelo de simulación del sistema de flujo de la infraestructura de transporte de las aguas residuales de la EPEP Centro, permitirá determinar los parámetros de diseño adecuados que garanticen los requerimientos operacionales del proceso.

Objetivo general: Diseñar el sistema de flujo de la infraestructura de transporte de las aguas residuales existente en la EPEP Centro, para determinar los parámetros técnicos operacionales que garanticen los requerimientos tecnológicos del proceso.

Objetivos específicos:

- Realizar el levantamiento físico de la infraestructura de transporte del agua residual, desde la Planta de Procesamiento de Crudo hasta la Batería de Cárdenas.
- Caracterizar los parámetros técnicos operacionales y propiedades físico química del fluido, del sistema transporte del agua residual.
- Simular el sistema de flujo, a partir de las características de infraestructura de transporte del agua residual.
- Definir los parámetros de diseño idóneos de la infraestructura de transporte del agua residual que garanticen los requerimientos tecnológicos del sistema de flujo.
- Analizar la factibilidad técnico – económica de la propuesta.

CAPÍTULO 1. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

1.1 Tratamiento y disposición del agua residual en la Industria Petrolera

Las aguas residuales producidas en la industria petroquímica pueden ser producto de procesos de extracción, producción o refinación. Estas pueden contener gran cantidad de sustancias orgánicas e inorgánicas, en concentraciones que ofrecen peligro para el ambiente, entre las cuales se encuentran: sulfuros, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, calcio, magnesio y sólidos en suspensión. Para la disposición de estas aguas, en el mundo actual existen tres vertientes: su empleo en procesos con recirculación, disposición de la misma con emisarios submarinos en el fondo del mar y la inyección directa en pozos. En dependencia de su disposición final y de la composición de la misma, se lleva a cabo un tratamiento previo ya que, según la *Environmental Protection Agency* (EPA), las aguas tienen que tratarse antes de ser vertidas de nuevo al medio (Corrales, 2004; Vacca, 2008).

Zainal (2009) expone que, históricamente, el agua producida, se depositaba en grandes pozas de evaporación, algo inaceptable para el medio ambiente y para las poblaciones circundantes. Un ejemplo de esto es lo ocurrido en noviembre de 2007 en los campos petroleros de Lago Agrio, en la provincia de Sucumbíos en Ecuador, donde se acumuló agua producida en piletas, cuyo contenido se acabó filtrando a los ríos y a la capa freática, lo cual causó una grave contaminación en las poblaciones cercanas. Este hecho ocurrió debido a que la ex-compañía Texaco no trató su agua producida (agua proveniente del interior del mismo pozo y altamente tóxica), y la acumuló en piletas al aire libre, en vez de reinyectarla dentro del pozo petrolífero. Juntar el agua producida en piletas era una práctica común de la industria en aquella época y no se tenía en cuenta los problemas ecológicos que acarrearaba.

El agua residual proveniente de los procesos petroquímicos, para ser reutilizada, debe ser tratada en una planta química; la complejidad de cada una de las etapas de este proceso hace que este tratamiento sea costoso en inversión y operación. Por otra parte, la disposición en el fondo del mar y la inyección directa en pozos llevan un menor tratamiento previo de la misma. La inyección directa en pozos es la más empleada por tener menos costos asociados, pero tiene el inconveniente de que se agota la capacidad de llenado del mismo (Corrales, 2004).

László (2014), plantea que el agua residual en forma de aceite en emulsiones de agua, no puede ser tratada eficazmente usando métodos físicos tradicionales, este autor expone el tratamiento de la misma mediante la técnica de membrana y el efecto de la pre-ozonación con una posterior microfiltración.

En el tratamiento de efluentes industriales que contengan metales, las bacterias pueden ser utilizadas con éxito, para el diseño de bioprocesos destinados a biodegradar el petróleo y evitar así, contaminaciones del suelo no deseadas (Raiger y López, 2009).

En Cuba, para la disposición de las aguas residuales generadas en las industrias petroleras, también predomina la inyección directa a pozos mediante un sistema de tuberías como es el caso del agua residual generada en la EPEP Centro. Los requisitos para el vertimiento de las aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado están expresados en la Norma Cubana NC 27:2012 (EPEP Centro, 2014).

1.2 Transporte y mecánica de los fluidos

Gynnild (2007) coincide con McCabe (1991) al definir que el comportamiento de los fluidos es importante para los procesos de ingeniería en general y constituye uno de los fundamentos para el estudio de las operaciones unitarias. El conocimiento de los fluidos es esencial, no solamente para tratar con exactitud los problemas de movimiento de fluidos a través de tuberías, bombas y otros equipos, sino también para el estudio del flujo de calor y de muchas operaciones de separación que dependen de la difusión y la transferencia de materia.

Geankoplis (1998), por su parte, plantea que en ingeniería, lo que más interesa es el comportamiento en conjunto o macroscópico de un fluido, y no el comportamiento molecular individual o microscópico.

La rama de la ingeniería que trata del comportamiento de los fluidos recibe el nombre de mecánica de fluidos, la cual está compuesta por dos ramas importantes para el estudio de las operaciones unitarias: la estática de fluidos, que trata los fluidos en el estado de equilibrio sin esfuerzo cortante, y la dinámica de fluidos, que trata los fluidos cuando partes de los mismos se mueven con relación a otras (McCabe, 1991).

En la transferencia de momento lineal o mecánica de fluidos como también se le denomina, se trata el fluido como una distribución continua del mismo. Este tratamiento es válido cuando el volumen más pequeño de fluido contiene un número de moléculas lo bastante grande como para que el promedio estadístico sea significativo y las propiedades macroscópicas del fluido, como densidad, presión, etc., varíen poco o de manera continua de un punto a otro (Geankoplis, 1998).

Zamora (2009), plantea que la Mecánica de Fluidos moderna se asienta sobre tres grandes métodos de análisis: el teórico-analítico, el teórico-numérico y el experimental.

Según Darby (2001), los principios fundamentales para el análisis de un sistema de flujo de fluidos son pocos y pueden ser descritos como las "leyes de conservación":

1. Conservación de la masa
2. Conservación de la energía (Primera Ley de la Termodinámica)
3. Conservación de cantidad de movimiento (Segunda Ley de Newton)

1.2.1 Conservación de la masa

Alfonso (2002), expone uno de los principios básicos en el estudio del movimiento de los fluidos: "La masa no se crea ni se destruye, sino que se conserva".

El ingeniero, apoyado en este principio, establece los llamados balances de materiales, que representan una contabilidad exacta de los materiales que entran, salen y se transforman en un proceso tecnológico, así como la composición de los mismos en las corrientes participantes. Estos balances pueden realizarse por componente (balance parcial) o con las corrientes completas, es decir, con todos los componentes simultáneamente (balance total) y pueden aplicarse tanto a nivel de equipo, sección de una planta o de forma general en la industria (González, 2004).

Según Geankoplis (1998) al calcular las velocidades de transporte en un sistema, empleando la ecuación de transporte molecular, es necesario tomar en cuenta la cantidad de esta propiedad que se transporta en todo el sistema. Esto se describe mediante una ecuación general de balance o conservación para la propiedad (momento lineal, energía térmica o masa) en estado no estacionario, unidireccional solo para la dirección z , indicando toda la propiedad que entra, sale, genera y se acumula en un sistema de manera, según la siguiente ecuación 2.1.

$$Masa_{que\ entra} + Masa_{que\ se\ genera} = Masa_{que\ sale} + Masa_{que\ se\ acumula} \quad ec.1.1$$

1.2.2 Conservación de la energía

Autores como Kundu (2002) y González (2004) plantean que el balance de energía se basa en el principio de conservación de la misma: la cantidad de energía introducida en un proceso, es igual a la energía saliente más la energía transformada, o sea, que la suma de todos los tipos de energía en un sistema cerrado es constante.

Formas principales de energía:

- Energía interna: Expresa la cantidad total de energía que posee un material debido a su posición relativa y movimiento de sus moléculas.
- Energía externa: Energía que posee el material en virtud a su posición y movimiento en el sistema macroscópico.
- Calor: Energía añadida al sistema o disipada por este en forma de calor.
- Trabajo: Energía en forma de trabajo realizado por el sistema o sobre este.

Teniendo en cuenta aspectos específicamente tecnológicos, los balances de energía pueden subdividirse del siguiente modo: balances entálpicos, balances de energía mecánica y balances térmicos.

La primera ley de la termodinámica establece la conservación de la energía, donde, en un sistema, el cambio de energía es la suma de la entrada de energía en forma de calor y de trabajo. La energía del sistema comprende la energía interna y la energía cinética. El trabajo se efectúa por las fuerzas de cuerpo y las fuerzas de superficie (Alfonso, 2002).

Según Levenspiel (1993), si se consideran las interacciones energéticas a medida que una corriente de materia fluye en régimen estacionario en un sistema de tuberías, se obtiene por cada unidad de masa de fluido circulante, a partir de la primera ley de la termodinámica, el balance de energía total:

$$\Delta U = \Delta \left(\frac{g_z}{g_c} \right) + \Delta \left(\frac{v^2}{2g_c} \right) + \Delta \left(\frac{p}{\rho} \right) = q - W_s \quad ec.1.2$$

Los términos de esta ecuación describen la variación de energía interna, energía potencial y energía cinética, el trabajo debido al flujo, el calor suministrado al fluido desde el entorno y el trabajo recibido por el entorno desde el fluido respectivamente.

▪ **Balance de energía mecánica**

Para cada unidad de masa de fluido real circulante, con sus inevitables efectos de fricción, sin efectos de trabajo no usuales (magnéticos, eléctricos, superficiales o químicos) y con un valor constante de gravedad, a partir de la ecuación de balance total de energía y teniendo en cuenta las pérdidas por fricción, se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli, el denominado «balance de energía mecánica» (Levenspiel, 1993; Rosabal, 2006).

$$Z_a + \frac{\alpha_a v_a}{2g} + \frac{P_a}{\rho g} + H_b = Z_b + \frac{\alpha_b v_b}{2g} + \frac{P_b}{\rho g} + h_f \quad \text{ec.1.3}$$

El balance de energía mecánica permite relacionar la velocidad del fluido (v), su presión (P) y su altura sobre un plano base (Z) en dos secciones paralelas de flujo (a y b) en un sistema. Esta ecuación depende del factor de corrección de la energía cinética (α), de la energía suministrada al fluido (H_b) y de las pérdidas por fricción (h_f).

1.2.3 Conservación de cantidad de movimiento

King (2002) coincide con Rosabal (2006) al plantear la Segunda Ley de Newton como: “La resultante de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo es igual a la variación de la cantidad de movimiento del mismo con el tiempo”.

Para flujo rectilíneo en estado estacionario, el balance de cantidad de movimiento se puede describir a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{(Velocidad de entrada de cantidad de movimiento)} - \text{(Velocidad de salida de cantidad de movimiento)} + \text{Suma de las fuerzas que actúan sobre el sistema} = 0 \quad \text{ec.1.4}$$

Al sistema puede entrar cantidad de movimiento por transporte, de acuerdo con la expresión newtoniana (o no-newtoniana), de densidad de flujo de cantidad de movimiento. También puede entrar cantidad de movimiento debido al movimiento global del fluido. Las fuerzas que interesan son las fuerzas de presión (actuando sobre superficies) y las fuerzas de gravedad (que actúan sobre todo el volumen).

Esta ecuación para el balance de cantidad de movimiento, puede aplicarse solamente cuando las líneas de corriente del sistema son líneas rectas, es decir para el flujo rectilíneo.

1.3 Parámetros de operación y diseño en un sistema de tuberías

Muchos procesos ingenieriles abarcan el procesamiento de grandes cantidades de materiales; para la realización de dicho procesamiento es necesario el transporte de los mismos de una operación a otra. Estos materiales son generalmente transportados en fase líquida, porque generalmente es mucho más fácil, efectiva y menos costosa que el transporte de materiales sólidos. Los líquidos pueden ser fácilmente trasladados en tuberías o canales abiertos y la energía requerida puede ser entregada al fluido con el empleo de una bomba (King, 2002).

El método más común para transportar fluidos de un punto a otro, es impulsarlo a través de un sistema de tuberías. Las tuberías de sección circular, son las más frecuentes, ya que esta forma ofrece no sólo mayor resistencia estructural, sino también mayor sección transversal para el mismo perímetro exterior que cualquier otra forma. Muy pocos problemas especiales de mecánica de fluidos, como es el caso del flujo en régimen laminar por tuberías, pueden ser resueltos por métodos matemáticos convencionales; todos los demás problemas necesitan métodos de resolución basados en coeficientes determinados experimentalmente. Muchas fórmulas empíricas han sido propuestas como soluciones a diferentes problemas de flujo de fluidos por tuberías, pero son muy limitadas y pueden aplicarse solo cuando las condiciones del problema se aproximan a las condiciones de los experimentos de los cuales derivan las fórmulas (Rosabal, 2006; Crane, s/a).

Milanés (2007), expone la siguiente clasificación para los sistemas de tuberías

Sistemas de tuberías

- Tubería simple.
- Sistemas de tuberías simples conectadas en serie.
- Sistemas de tuberías simples conectadas en paralelo.
- Sistemas de tuberías simples conectadas en serie – paralelo.

Redes de Tuberías

- Red ramificada.
- Red mallada.
- Red mixta.

Gotera (2008), plantea los pasos que deben completarse en el diseño mecánico de cualquier sistema de tuberías:

- a. Establecimiento de las condiciones de diseño incluyendo presión, temperaturas y otras condiciones, tales como la velocidad del viento, movimientos sísmicos, choques de fluido, gradientes térmicos y número de ciclos de varias cargas.
- b. Determinación del diámetro de la tubería, el cual depende fundamentalmente de las condiciones del proceso, es decir, del caudal, la velocidad y la presión del fluido.
- c. Selección de los materiales de la tubería con base en corrosión, fragilización y resistencia.
- d. Selección de válvulas y accesorios.
- e. Cálculo del espesor mínimo de pared para las temperaturas y presiones de diseño, de manera que la tubería sea capaz de soportar los esfuerzos tangenciales producidos por la presión del fluido.
- f. Establecimiento de una configuración aceptable de soportes para el sistema de tuberías.
- g. Análisis de esfuerzos por flexibilidad para verificar que los esfuerzos producidos en la tubería por los distintos tipos de carga estén dentro de los valores admisibles, a objeto de comprobar que las cargas sobre los equipos no sobrepasen los valores límites, satisfaciendo así los criterios del código a emplear.

Las normas más utilizadas en el análisis de sistemas de tuberías son las normas conjuntas del *American Estándar Institute* y la *American Society of Mechanical Engineers*. Cada uno de estos códigos recoge la experiencia de numerosas empresas especializadas, investigadores, ingenieros de proyectos e ingenieros de campo en áreas de aplicación específicas. En lo que concierne al diseño todas las normas son muy parecidas, existiendo algunas discrepancias con relación a

las condiciones de diseño, al cálculo de los esfuerzos y a los factores admisibles (Gótera, 2008).

1.3.1 Presión de diseño

La presión de diseño no será menor que la presión a las condiciones más severas de presión y temperatura coincidentes, externa o internamente, que se espere en operación normal. La condición más severa de presión y temperatura coincidente, es aquella que resulte en el mayor espesor requerido y en la clasificación más alta de los componentes del sistema de tuberías (Gótera, 2008).

La caída de presión total a lo largo de una tubería, según Milanés (2007), está dada por las pérdidas por fricción, las pérdidas debido a los cambios de elevación y la caída de presión requerida para acelerar el fluido; esta última es usualmente despreciable.

1.3.2 Temperatura de diseño

La temperatura de diseño es la temperatura del metal que representa la condición más severa de presión y temperatura coincidentes. Los requisitos para determinar la temperatura del metal de diseño para tuberías son como sigue (Gótera, 2008):

- Para componentes de tubería con aislamiento externo, la temperatura de diseño para el metal será la máxima temperatura de diseño del fluido contenido.

Para componentes de tubería sin aislamiento externo y sin revestimiento interno, con fluidos a temperaturas de 32°F (0°C) y mayores, la temperatura de diseño del metal será la máxima temperatura de diseño del fluido reducida, según los porcentajes establecidos en la bibliografía consultada.


1.3.3 Selección de materiales


La primera vía de que disponen los técnicos e ingenieros para evitar o minimizar los problemas de corrosión en la industria química, es la adecuada selección de materiales. Esta selección está condicionada por muchos factores como son propiedades mecánicas, tecnológicas, disponibilidad y sobre todo por el costo elevado de los materiales metálicos altamente resistentes a la corrosión. Por esta razón frecuentemente resulta más racional el uso de materiales menos costosos con la aplicación de algún método de protección.

Un material de construcción de la industria química debe poseer las siguientes cualidades (Domínguez, 1987):

- Propiedades físicas y mecánicas que estén de acuerdo con las condiciones del equipo o estructura donde va a ser utilizado.
- Buena resistencia a la corrosión.
- Que sea compatible con los equipos existentes, es decir, que su composición no sea muy diferente a la de los materiales de construcción del equipo donde se va a utilizar.
- Tener un amplio campo de aplicabilidad considerando los requerimientos del proceso tecnológico.
- Su empleo debe ser económico, incluyendo tanto el costo del material, como los costos de fabricación, mantenimiento e inspección.
- Tiempo de vida útil.
- Disponibilidad y tiempo entrega.

Los materiales a emplear en un sistema de tuberías dependerán del tipo de fluido a transportar y de las condiciones ambientales a las que se encuentre expuesto, factores que influyen en la tendencia corrosiva de los mismos. Otro factor importante a tener en cuenta para su selección, lo constituye su disponibilidad y acceso en el mercado. A continuación se exponen algunos de los principales materiales empleados en las mismas así como sus ventajas y desventajas (Gótera, 2008):

 **Tuberías de fundición:** Las ventajas radican en que son de una elevada resistencia a cargas exteriores, su comportamiento es similar a una tubería flexible, por tanto es menos sensible a deficiencias de puesta en obra de la tubería y presenta una gran resistencia a presiones interiores elevadas. Su desventaja principal es la corrosión superada con los recubrimientos plásticos. A pesar de su costo, la penetración en el mercado de abastecimientos es cada día mayor y la hace en estos momentos una tubería muy competitiva en calidad.

 **Tuberías de acero:** son muy resistentes a la rotura, pero fácilmente oxidables. Las ventajas que presentan es que son de costo discreto y baja fragilidad. También son muy resistente a presiones internas, aunque menos que las de


fundición dúctil y los problemas de corrosión pueden ser resueltos con el empleo de pinturas. La desventaja más importante es que disponen de una baja rigidez haciéndola vulnerable a aplastamientos.

✚ **Tuberías de fibrocemento:** Entre las ventajas de este material está la fácil manipulación en obra, su rugosidad es muy reducida ($k = 0,25 \text{ mm}$) y el bajo costo. Entre los inconvenientes el más destacado es la fragilidad a cargas exteriores. Debe cuidarse, por tanto, la puesta en zanja y su profundidad en lugares de tráfico. Ha sido una tubería muy utilizada en abastecimientos de agua, son muy numerosas las redes ramificadas existentes en poblaciones españolas que dan testimonio de ello, especialmente por el bajo costo de esta conducción.

✚ **Tubería de hormigón armado y pretensado:** Entre las ventajas que presenta la tubería de hormigón armado con camisa de chapa, es la resistencia a altas presiones en grandes diámetros, dando excelentes prestaciones. Como desventaja pueden presentar problemas en las juntas, requiere un control de calidad que encarece la puesta en obra.

✚ **Tuberías de policloruro de vinilo (PVC):** Este material presenta dos características importantes: al ser un material termoplástico, se ablanda con el calor, manipulado y enfriado posteriormente, conserva la manipulación y puede unirse mediante cola, cuya unión presenta una gran resistencia mecánica. Existen dos clases de tuberías de PVC: plastificado y rígido. Presentan la ventaja de su manejabilidad y fácil puesta en obra, su inconveniente es el envejecimiento que da lugar a fisuras longitudinales como consecuencia del tipo de estructura molecular.

✚ **Tuberías de polietileno (PE):** Las tuberías de PE son atacadas por aceites, grasas y gasolina, siendo además combustibles. Su resistencia a la presión del agua disminuye con el tiempo, por lo que son precisos mayores espesores de las paredes. Padece del mismo problema que las tuberías de PVC, el envejecimiento, que para evitarlo se le adiciona una pequeña cantidad de negro de humo, un 3 % aproximadamente y un antioxidante. Este material presentan ventajas e inconvenientes similares al PVC.

 **Tuberías de poliéster reforzadas con fibra de vidrio (PRFV):** Aunque no se emplean en las redes de distribución de agua como conductos generales de la red, si pueden emplearse en acometidas domiciliarias. Las tuberías de PRFV, están formadas por la unión íntima de resina y fibra de vidrio, la resina actúa como aglomerante, además de estanqueidad, la fibra realiza el papel resistente.

1.3.4 Corrosión en sistemas de conducción de agua

La corrosión en las tuberías, como se mencionaba anteriormente, es otro aspecto importante a tener en cuenta en la selección del material y en el diseño de sistemas de flujo. Todas las aguas son corrosivas en cierto grado, las propiedades corrosivas de las mismas dependerán de sus características químicas y físicas, pero además de la naturaleza del material con la cual entre en contacto. Además los desarrollos biológicos también originan corrosión al proveer un ambiente donde pueden ocurrir interacciones físicas y químicas. Los mecanismos reales de la corrosión en un sistema de conducción de agua son usualmente una combinación interrelacionada y compleja de los procesos biológicos, físicos y químicos. Los fenómenos de corrosión y de incrustación, también están relacionados directamente con la velocidad del agua y el tiempo de retención hidráulico. Específicamente, la alcalinidad, pH y los residuos de desinfectantes son los principales factores que influyen en el proceso de corrosión. Para determinar el carácter agresivo o incrustante del agua en función de la temperatura, pH, dureza, alcalinidad y sólidos disueltos, se ha propuesto un cierto número de índices, siendo el más utilizado el índice de Ryznar (IR). A través de este índice se define la agresividad del agua (Sousa, 2010).

1.3.5 Diámetro de las tuberías

El diámetro de la tubería se especifica a partir de la determinación de la velocidad máxima en la tubería para el volumen máximo conocido de diseño que manejará el sistema. La tendencia, desde hace más de 20 años, ha sido aumentar la velocidad del líquido en la tubería para reducir el costo de instalación. Un importante fabricante ha establecido la regla de no exceder una velocidad máxima en la tubería de 7 ft/s para líquidos (Green, s/a).

El mínimo espesor de pared para cualquier tubería sometida a presión interna o externa es una función de:

- a. El esfuerzo permisible para el material de la tubería.
- b. Presión de diseño
- c. Diámetro de diseño de la tubería.
- d. Diámetro de la corrosión y/o erosión

Además, el espesor de pared de una tubería sometida a presión externa es una función de la longitud de la misma. El mínimo espesor de pared de cualquier tubería debe incluir la tolerancia apropiada de fabricación. (Gótera, 2008).

1.3.6 Disposición de las tuberías

Después de que el diámetro y el material de la tubería han sido seleccionados así como el espesor de pared requerido y los tipos de válvulas y accesorios han sido establecidos, el diseñador tiene que elaborar una disposición económica de las tuberías para el nuevo sistema. Además, debe familiarizarse con los problemas de soportaría, los tipos disponibles de soportes y su aplicación. Las líneas de tubería deben ser proyectadas para usar las estructuras existentes en los alrededores con espacio disponible en las mismas y para proveer puntos lógicos de soporte. (Gótera, 2008).

En la disposición y arreglo de sistemas de tuberías, además deben tomarse en consideración los siguientes requerimientos: facilidad de operación, accesibilidad para mantenimiento, economía, requerimientos especiales de proceso, ampliaciones futuras y apariencia

1.3.7 Análisis de flexibilidad

El análisis de flexibilidad de tuberías consiste en determinar si una línea posee la suficiente capacidad para absorber las cargas que inciden sobre ella tales como el propio peso de la tubería, la expansión térmica, las fuerzas producidas por la presión del fluido, vibraciones y terremotos entre otras. Uno de los factores que pueden aumentar o disminuir la flexibilidad de una tubería es su configuración geométrica.

Los sistemas de tuberías deben poseer la flexibilidad suficiente de manera que la expansión o la contracción térmica, así como los movimientos de soportes y equipos, no conduzcan a:

- a. Falla de la tubería o de los soportes por esfuerzos excesivos o fatiga.
- b. Fugas en las juntas
- c. Falla de las boquillas de los equipos conectados (recipientes a presión, bombas, turbinas.), por reacciones excesivas.

Programas como el CAESAR II están disponibles para ejecutar análisis detallados de los esfuerzos en sistemas de tuberías con muchas ramificaciones (Gótera, 2008).

1.3.8 Equipos de bombeo

Autores como Castillo (2007) y Anibal (2008), exponen que siempre que se traten temas como la circulación de fluidos y los procesos químicos, se está de alguna manera entrando en el tema de las bombas. Una bomba es una turbo máquina generadora para líquidos que se usa para transformar la energía mecánica en energía cinética, generando presión y velocidad en el fluido. Un sistema de bombeo puede definirse como la adición de energía a un fluido para moverse o trasladarse de un punto a otro. Existen muchos tipos de bombas para diferentes aplicaciones. Los factores más importantes que permiten escoger un sistema de bombeo adecuado son: presión del proceso, velocidad de bombeo y tipo de fluido a bombear. Las dos primeras operan sobre el principio de desplazamiento positivo, es decir, que bombean una determinada cantidad de fluido sin tener en cuenta las fugas independientemente de la altura de bombeo. El tercer tipo debe su nombre a un elemento rotativo, llamado rodete, que comunica velocidad al líquido y genera presión. La carcasa exterior, el eje y el motor completan la unidad de bombeo.

1.3.9 Válvulas y accesorios

Conforme avanza la tecnología y aumenta la capacidad de las plantas, han aumentado el tamaño y el costo de las válvulas, y es cada vez más importante la selección adecuada. La selección de las válvulas incluye muchos factores y es preferible tener como referencia un sistema que facilite la selección. Se deben tener en cuenta, como mínimo, las siguientes características básicas: tipo de válvula,

materiales de construcción, capacidades de presión y temperatura, material de empaquetaduras y juntas, costo y disponibilidad.

El tipo de válvula dependerá de la función que debe efectuar, sea de cierre (bloqueo), estrangulación o para impedir el flujo inverso. Estas funciones se deben determinar después de un estudio cuidadoso de las necesidades de la unidad y del sistema para los cuales se destina la válvula. Dado que hay diversos tipos de válvulas disponibles para cada función, también es necesario determinar las condiciones del servicio en que se emplearán las válvulas. Es de importancia primordial conocer las características químicas y físicas de los fluidos que se manejan. Una vez determinadas las presiones y temperaturas máximas de operación, el ingeniero podrá establecer la capacidad de presión requerida por la válvula.

Todas las partes de la válvula que están en contacto con el fluido deben tener la resistencia necesaria a la corrosión. Para seleccionar materiales de construcción resistentes, el ingeniero debe utilizar como guía los materiales recomendados por los fabricantes para los diversos tipos de servicios así como los datos publicados. Si esa información parece ser inadecuada, habrá que obtener datos de la corrosión mediante pruebas de laboratorio. En general, salvo que se trate de un proceso totalmente nuevo, no habrá problema para determinar los materiales de construcción con base en la información existente.

Muchas veces se encontrará más de un tipo de válvula para un trabajo específico. Cuando todos los factores, como materiales de construcción, rendimiento, capacidad para presión y temperatura y disponibilidad son iguales, se debe seleccionar la válvula teniendo en cuenta el costo y la disponibilidad (Green, s/a).

1.4 Modelación y simulación en sistemas de Ingeniería Química

El autor coincide con Srivastava (2010), al plantear que la modelación matemática es mucho más que un arte, esta conlleva experiencia, práctica e inteligencia para lograr un buen modelo matemático. Sin dudas el resultado más importante del desarrollo de un modelo matemático de un sistema de ingeniería química es la comprensión de lo que realmente ocurre en el proceso. Este entendimiento permite la cercanía al núcleo del sistema alejando o desechando los factores confusos.

Los modelos matemáticos pueden ser empleados en todas las fases de la ingeniería química para la búsqueda y desarrollo en operaciones de plantas químicas y pueden además ser aplicados en estudios de economía y negocios (Aguilar, 2004).

La simulación es un procedimiento para la realización de experimentos por medio de una computadora digital y con la ayuda de modelos matemáticos, con el fin de obtener información sobre el comportamiento del sistema. En general, mediante la técnica de simulación se pueden analizar el efecto de las interrelaciones de un sistema o proceso dado, determinar las recirculaciones, hacer estudios de capacidad, detectar cuellos de botella, definir las condiciones límites de operación, entre otras aplicaciones. Por lo tanto, se llega al concepto de Análisis de Procesos, que es la habilidad de convertir un problema de Ingeniería en una formulación matemática, para obtener la información final del problema, mediante la aplicación de las técnicas de computación (Campbell, 2010).

Teniendo en cuenta estos elementos, no se puede considerar a la Modelación Matemática como un fin en sí mismo, sino como un paso hacia la simulación y a su vez la simulación se debe considerar como una herramienta a utilizar en el Análisis de Procesos en general y en este caso, en los Procesos Industriales. No obstante la modelación matemática constituye una primera etapa obligada para realizar la simulación y el análisis de procesos (Kleijnen, 2009).

La modelación y simulación de diferentes sistemas se llevan a cabo para alcanzar los siguientes propósitos (Chung, 2004):

- Mayor comprensión en la operación de un sistema: Algunos sistemas son tan complicados que resulta difícil entender la operación y las interacciones que ocurren dentro del mismo sin un modelo dinámico. En otras palabras, puede ser imposible estudiar un sistema a partir de su detención o examinando reiteradamente de forma individual sus componentes.
- Desarrollo de las operaciones o de políticas de recursos para mejorar el funcionamiento del sistema: Otro caso puede ser estar en presencia de un sistema entendible que se quiere mejorar. Para ello se puede proceder de dos formas fundamentalmente: cambiar la forma de operación o las políticas de

recursos. Los cambios en las políticas operativas pueden llevar a prioridades diferentes de la planificación en las exigencias de trabajo.

- Probar nuevos conceptos o sistemas antes de la implementación de los mismos: Un modelo de simulación puede brindar una idea de cómo funcionará el sistema propuesto. El costo de modelar un sistema nuevo puede ser muy pequeño en contraste con la inversión de capital involucrada en la instalación de cualquier proceso de fabricación significativo. Además, puede ayudar a determinar la configuración del equipo seleccionado. Aún después de la instalación, el modelo de simulación puede ser útil, debido a que la compañía puede emplear el mismo para identificar problemas que fueron garantizados que no debería presentar el sistema instalado.
- Ganancia de información sin perturbaciones en el sistema: Los modelos de simulación son posiblemente el único método disponible para la experimentación con sistemas que no pueden ser perturbados. Algunos sistemas son tan críticos o sensibles que no se logra hacer cualquier tipo de cambios operativos, de política de recurso o simplemente el análisis del mismo.

Feliu (2006) coincide con Carlson (1996), al ratificar que la aplicación de la termodinámica a los modelos de simulación, ha permitido avanzar a la industria de proceso en el diseño de nuevas plantas y en la operación de las existentes. La elección del correcto conjunto de ecuaciones que puedan representar las propiedades físicas y termodinámicas y el equilibrio de las fases fluidas se denota como etapa crítica para el éxito del proyecto de simulación.

Por otra parte Barjis (2008), plantea que la validación de los modelos de simulación es de gran importancia para la obtención de resultados reales.

1.4.1 Software para la simulación de procesos químicos. Aplicaciones

El uso de herramientas dirigidas al Diseño de Procesos Asistido por Computadoras (DPAC), según Arora (2005), ha sido empleado con éxito desde principio de los años 60, con aplicaciones específicas en las diferentes industrias así como en el diseño y optimización de procesos integrados. Estos beneficios son igualmente previsibles en aplicaciones para procesos dirigidos al tratamiento de emisiones atmosféricas y de efluentes líquidos entre otros.

Un ejemplo de lo antes expuesto se muestra en Pérez (2004), el cual presenta el desarrollo de un Programa de Simulación de Procesos para el Tratamiento de Emisiones Atmosféricas en la Universidad de Carabobo (SIMTEGUC). Este programa permite simular procesos para el tratamiento de emisiones atmosféricas, bajo un enfoque modular secuencial con una estructura sencilla y abierta a los diferentes usuarios. En el estudio realizado, todos los módulos desarrollados fueron validados individualmente a partir de un estudio comparativo con los resultados aportados por la simulación del mismo caso mediante un programa comercial, observándose una desviación menor al 7%.

El autor coincide en que el programa desarrollado entrega buenos resultados y se puede extender su uso a otras áreas.

Castro (2013), expone un caso similar en la Evaluación de atmósferas peligrosas en la zona industrial de Matanzas ante posibles accidentes químicos mediante el empleo del software ALOHA, por sus siglas en inglés (*Area Locations of Hazardous Atmospheres*). Expone además que con estos fines pueden ser empleados otros software como: *SCREEN*, *Software CALMET* y *CALPUFF*, *DEGADIS* y *DISPER 5.2*

García (2003), plantea la determinación del diámetro en sistemas de tuberías a partir del software *Mathcad*, el cual plantea del mismo que: "Con el uso del *Mathcad* se reduce la posibilidad de cometer errores, puesto que resuelve directamente la ecuación de *Colebrook-White*, con la que se obtiene el valor del factor de fricción; además, al evitar el uso del diagrama de *Moody*, se reduce el tiempo de cálculo y se incrementa la precisión en la obtención del valor del factor de fricción. Cuando varían las condiciones del sistema, como serían los gastos, las rugosidades, las cargas, las viscosidades, etc., es posible determinar en forma rápida y precisa, la variación del diámetro requerido".

Por otra parte *Plant Simulation*, según Bangsow (2009), es una aplicación de computadora desarrollada por *Siemens PLM Software* para modelar, simular, analizar, visualizar y optimizar sistemas productivos y de procesos, el flujo de materiales y operaciones logísticas. Utilizando *Plant Simulation*, los usuarios pueden optimizar el flujo de materiales, utilización de recursos y logística para todos los niveles

de planeación de plantas desde manufactureras globales, fábricas locales y líneas específicas.

Hoy en día se dispone de una gran cantidad de programas comerciales de simulación de procesos dirigidos a la industria química y petroquímica, tales como *HYSYS* (*Hyprotech, Ltd/AEA Engineering Software*), *ChemCad* (*Chemstations, Inc.*), *Aspen Plus* (*Aspen Technology, Inc.*), *ANSYS*, etc., sólo por mencionar algunos (Pérez, 2004).

Autores como Hung (2005) y Gynnild (2007) plantean la aplicación de la simulación del flujo de fluidos en la enseñanza universitaria y su impacto en el aprendizaje de las diferentes ramas de la ingeniería como la Mecánica de Fluidos entre otras.

1.5 Evaluación técnica - económica de procesos

Jiménez (2003) plantea que la industria química representa un importante sector en el mundo actual. Su impacto en la economía y en el estándar de vida es evidente, ya que opera bajo un escenario económico y un ambiente competitivo, criterio con el que coincide la autora de esta industrial, desde la idea inicial hasta su funcionamiento como una unidad de producción, es un proceso continuo en el tiempo, a través de sucesivas fases. En dichas fases se combinan consideraciones de carácter operacional, técnico y económico, estudiadas a través de diferentes etapas.

El proyecto comienza con una idea de invertir una cierta cantidad de capital en la producción de un cierto bien o servicio. Esa idea tiene que ser desarrollada por un estudio que incluye las diferentes etapas, inclusive la etapa final donde se estudian las operaciones de la ejecución del proyecto.

Básicamente el proceso de elaboración y ejecución del proyecto, a lo largo del tiempo debe seguir cinco fases distintas: la identificación de la idea, el estudio de pre-factibilidad, el estudio de factibilidad, la fase de ingeniería y la ejecución.

Durante la fase de identificación, los proyectistas deben caracterizar, en forma preliminar, el concepto de idea, dando la base para indicar si la misma justifica ser estudiada o no. En el caso que se recomiende que la idea debe ser estudiada, los proyectistas profundizan en la misma, realizando un estudio de pre-factibilidad, durante el cual es elaborado un proyecto preliminar, con base a datos no necesariamente definitivos o completos (Weston, 2001; Hernández, 2003).

De ahí que muchos proyectos toman un tiempo apreciable para llegar a un buen entendimiento y a resultados técnicos favorables. Sin embargo, al tratar de integrar ese proceso en un ambiente industrial existente, es muy común encontrar que su análisis económico arroja un resultado desfavorable. En tales casos, se tienen varios años de investigación perdidos. Sería conveniente entonces tener la posibilidad de estimar, desde un nivel aceptable de precisión, el costo del proceso que emergería de ese programa de investigación básica. Sólo en caso de que se justifique invertir, se hará un estudio definitivo en el que los proyectistas parten para la elaboración del estudio de factibilidad (Jiménez, 2003).

1.5.1 Estudio de Factibilidad

Un estudio de factibilidad consiste en ordenar las alternativas de solución para el proyecto, según los criterios elegidos para asegurar la optimización de los recursos económicos, técnicos y humanos, empleados, y los efectos del proyecto en el área o sector de destino. El estudio de factibilidad de un proyecto tiene como finalidad (Turmero, 2013):

- Determinar las características técnicas de la operación.
- Fijar los medios para implementar la organización requerida y los problemas humanos que conlleva.
- Establecer los costos de operación (estimativos provisionales).
- Evaluar los recursos disponibles reales o potenciales.

La evaluación de un proyecto de factibilidad estará centrada especialmente en los recursos, los cuales se analizarán en tres aspectos básicos: Operativos, técnicos y económicos, así como en los posibles resultados, por tanto, el éxito del proyecto estará determinado por el grado de factibilidad que se presente en cada uno de los tres aspectos anteriores. De allí que se contemplen las siguientes factibilidades:

Factibilidad Operativa: Se refiere a todos aquellos recursos donde interviene algún tipo de actividad (procesos), depende de los recursos humanos que participen durante la operación del proyecto. Durante esta etapa se identifican todas aquellas actividades que son necesarias para lograr el objetivo, evaluando y determinando lo necesario para llevarla a cabo.

Factibilidad Técnica: Se refiere a los recursos que son necesarios para efectuar las actividades que requiere el proyecto. Generalmente nos referimos a elementos tangibles (medibles). El proyecto debe considerar si los recursos técnicos actuales son suficientes o deben complementarse.

Factibilidad Económica: Se refiere a los recursos económicos y financieros necesarios para desarrollar o llevar a cabo las actividades o procesos y/o para obtener los recursos básicos que deben considerarse como son el costo del tiempo, el costo de la realización y el costo de adquirir recursos. Por tanto, la factibilidad económica se evalúa a través del análisis de beneficio-costos, el cual compara beneficios y costos del proyecto y, si los primeros exceden a los segundos, se dispone entonces de un primer juicio que indica su viabilidad (Turmero, 2013).

- **Valoración de beneficios y costos.**

El método de selección de alternativas más comúnmente utilizado para analizar la deseabilidad de un proyecto es la razón beneficio/costo (BC). Se considera que un proyecto es atractivo cuando los beneficios derivados de su implementación y reducidos por los beneficios negativos esperados exceden sus costos asociados. Por tanto, el primer paso en un análisis BC es determinar cuáles de los elementos son beneficios positivos, negativos y sus costos. Sus descripciones deben ser expresadas en términos monetarios.

Para la valoración y cuantificación de los beneficios y costos se han propuesto numerosos mecanismos (Turmero, 2013):

1. Cambios de la productividad en el tiempo.
2. Pérdida de ingresos.
3. Cálculo de los gastos evitados
4. Costo de reemplazo o costos evitados.
5. Criterio de costo comparativo.
6. Valoración a través de la productividad primaria natural (PPN) del ecosistema.

En la evaluación económica los costos y beneficios se calculan por medio de precios sombra con el fin de cuantificar el beneficio neto real del proyecto a la economía (Blank y Tarquin 1999).

Para la evaluación económica del material es necesario tener en cuenta el costo de la protección de los mismos, los costos de preparación, instalación y aplicación de la protección, los costos de mantenimiento, la vida útil estimada para el material y el costo inicial del material (Domínguez, 1987).

Conclusiones parciales del capítulo

- La inyección directa en pozos mediante un sistema de tuberías es el método más empleado en la industria petroquímica para la disposición final del agua residual.
- Los principios fundamentales que rigen el análisis de un sistema de flujo de fluidos son las leyes de conservación de la masa, la energía y la cantidad de movimiento.
- En la operación y diseño de tuberías los parámetros fundamentales son el flujo, la presión y la temperatura del fluido así como el material, la disposición y dimensiones de las mismas.
- A partir de la modelación y simulación de los procesos industriales se pueden probar nuevas condiciones de diseño sin provocar perturbaciones en el sistema.
- En la etapa inicial del diseño de un proceso es necesario desarrollar un estudio de pre-factibilidad económica para justificar la continuidad del mismo.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación está encaminada a diseñar la infraestructura de transporte de agua residual de la EPEP Centro, mediante la simulación y evaluación del sistema, teniendo en cuenta la estructura del mismo y el comportamiento de cada una de las variables que intervienen en el proceso.

Según los objetivos propuestos, esta investigación se define como Explicativa - Descriptiva y de Campo, y el diseño metodológico de la misma se puede apreciar en el siguiente esquema:

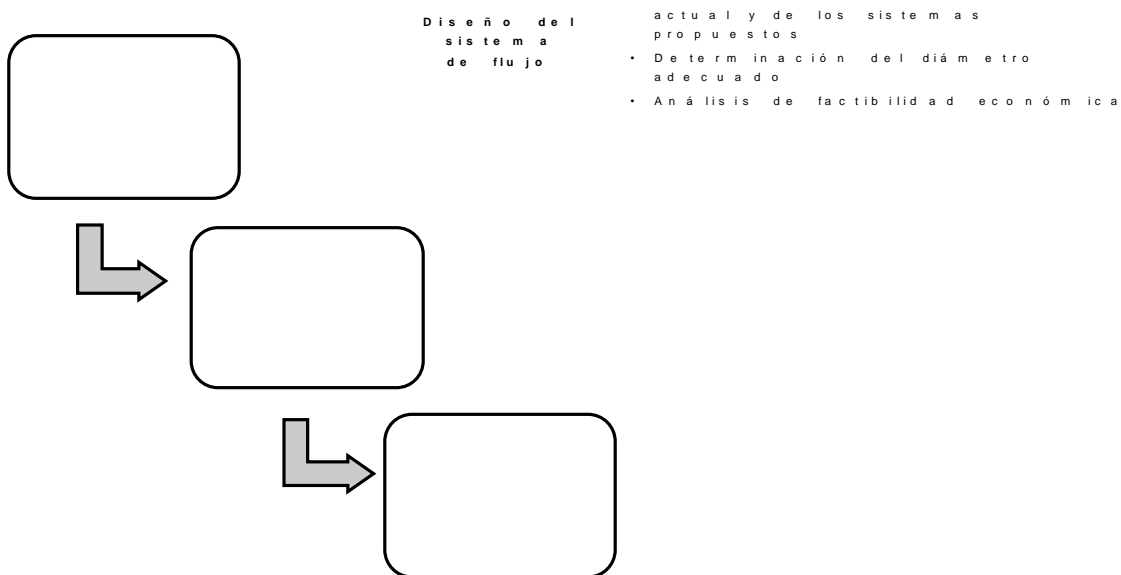


Figura 2.1 Diseño Metodológico de la investigación

2.1 Descripción tecnológica del proceso

El agua separada en el Proceso de Tratamiento del Petróleo, es drenada hacia los tanques de tratamiento de residuales, hasta alcanzar un nivel de colchón que permita un mejor funcionamiento del proceso tecnológico de la planta (ver anexo 1). A los tanques del sistema de residuales, además de esta agua, llegan también otras aguas como son el agua de capa libre que llega del campo por pailas, el agua proveniente de la regeneración de los filtros, el agua tratada y el agua de purga de las calderas, el condensado contaminado, el agua residual sobresaturada en sólidos proveniente del contralavado de los filtros de grava y además el agua residual de la Empresa de Energía y Gas (ENERGAS).

El tratamiento de todas estas aguas se realiza en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, donde se les separan los hidrocarburos y los sólidos suspendidos, los cuales son incompatibles con la inyección a la capa. Los hidrocarburos separados se recuperan e incorporan al proceso de tratamiento nuevamente, mientras que los sólidos suspendidos son eliminados por precipitación en el tanque separador y por medio de filtración. El agua una vez tratada, es transportada hacia el tanque de almacenamiento # 5, y bombeada al punto de inyección ubicado en la Batería de Cárdenas (ver anexo 2).

El agua en el punto de inyección se recibe en los tanques 1, 2 o 4, los cuales posteriormente se comunican por gravedad con el tanque # 5, para ser bombeada al pozo de inyección. También se pudiera inyectar desde cualquier otro tanque siempre que el agua tenga un tiempo de reposo no menor de 4 h (EPEP Centro, 2014).

El proceso tecnológico del sistema de residuales de la EPEP Centro, está compuesto por las siguientes etapas:

- Etapa 1. Separación del Petróleo

El agua generada en el proceso de producción llega al tanque separador # 13 por la entrada de drenaje ubicada en el fondo del mismo. Una vez que se comience a llenar el tanque, se chequea por los toma muestras, definiendo el nivel en que se encuentra la interfase agua-petróleo. La válvula que comunica el tanque # 13 con el tanque # 10 debe estar cerrada y sólo se abre cuando se llega al nivel máximo de operación en el mismo y luego de haber dado un tiempo de reposo al tanque # 13 de treinta minutos como mínimo. Esta operación tiene el objetivo de garantizar la separación de las fases agua-petróleo, la eficiente recuperación de hidrocarburos y evitar que agua con alto contenido de hidrocarburos pase hacia el tanque # 9, así como gran parte de los sólidos suspendidos por precipitación. De aquí se bombea a través de los filtros de grava con el propósito de eliminar los sólidos suspendidos que no precipitaron en los tanques separadores. Esta operación se realiza una y otra vez hasta que el nivel del colchón del tanque en cuestión cumpla los requisitos del tratamiento.

Para realizar la operación de recuperación de petróleo se debe identificar primero la cantidad de hidrocarburos presentes en el tanque # 13, para luego llevar el mismo hasta el nivel mínimo de operación y cuando esté próxima la interfase a la salida de recuperación de petróleo, comunicarla con la piscina de recepción para drenar todo el petróleo hacia la misma.

- Etapa 2. Filtrado Mecánico del agua de capa

Con el objetivo de disminuir la concentración de sólidos en suspensión presentes en el agua de capa, se instalaron dos filtros de grava en los cuales el agua entra a los mismos por la parte superior, donde se encuentra ubicado un distribuidor que garantiza la distribución uniforme del agua dentro del filtro, para después pasar a través de las capas de grava de diferente granulometría. Una vez que pase el agua por las distintas capas, sale de los filtros por la parte inferior a través de una serie de toberas de 6 mm, hacia el tanque #5 de almacenamiento final en Batería Central.

La velocidad normal de filtración recomendada en un filtro de arena, con un área de filtración de $5,15 \text{ m}^2$, oscila entre $0,084$ y $0,13 \text{ m}^3/\text{min}$ por m^2 de superficie filtrante. En las condiciones de operación de la planta, en la cual la bomba entrega un promedio de $78 \text{ m}^3/\text{h}$ y los dos filtros trabajan en paralelo, la capacidad de filtración es de $0,12 \text{ m}^3/\text{min}$ por m^2 de superficie filtrante, resultando alto pero en el rango recomendado.

Cuando los filtros alcanzan una caída de presión de $2,8 \text{ atm}$ siendo para esta condición la presión de entrada a los mismos de $\pm 3,2 \text{ kgf/cm}^2$, nos indica que existe gran cantidad de sedimentos en la capa filtrante, por lo que es necesario realizar un contralavado para devolverle su capacidad de operación.

La operación de contralavado se realiza mediante la inyección de agua limpia proveniente del tanque # 9. En esta operación se utiliza una bomba *Emica*, con el objetivo de expandir el lecho filtrante para facilitar la salida de los sólidos retenidos, que impiden, por la cantidad acumulada, el buen funcionamiento ocasionando desviación en los parámetros permitidos. Esta operación se realiza por espacio de 25 a 30 min utilizando para esto una de las bombas de trasiego al punto de inyección con un caudal de contralavado de 100 a $120 \text{ m}^3/\text{h}$. Si con esta operación no se logra

restablecer las propiedades de filtración, se procede a abrir el *manjole* superior y se sustituye la capa filtrante.

El agua del contralavado es enviada al tanque # 10 donde se procesa nuevamente y los sedimentos son acumulados en el fondo del tanque. Estos sedimentos por sus características no son fáciles de manejar, por ello se van acumulando en un tanque separador hasta que la altura de sedimentos sea de 40 cm. Una vez alcanzada la altura requerida en el interior del tanque separador, se extraen de forma mecánica y son depositados en la cantera destinada y aprobada por el Grupo de Seguridad Industrial.

- Etapa 3. Almacenamiento.

El agua antes de pasar por los filtros de grava se almacena en el tanque # 9 de 900 m³ de capacidad, de éste succionan las bombas encargadas de bombear el agua para los puntos de inyección. Además, el agua tratada almacenada en este tanque es utilizada en el proceso de contralavado de los filtros de grava.

- Etapa 4. Trasiego

En la estación de bombas de trasiego al punto de inyección, existen dos tipos de bombas que realizan diferentes operaciones. La bomba 9MGR que es la encargada de achicar las bateas de los toma muestras de todos los tanques del proceso, aunque también si es necesario trasiega agua a los puntos de inyección, y las tres bombas centrífugas *Goulds*, que son las encargadas de trasegar toda el agua del proceso de tratamiento de residuales hacia los puntos de inyección y también cumplen la función de bombear el agua necesaria para realizar el contralavado a los filtros de grava.

El sistema de *manifolds* instalado en la descarga de las bombas, está diseñado de tal manera que posibilita la realización de varias operaciones al mismo tiempo. De esta manera se puede trasegar agua hacia los puntos de inyección y se bajan las bateas de los tanques sin que una operación interrumpa a la otra. La salida de los filtros está conectada a través de una válvula con el acueducto, en caso de que por alguna razón no estén disponibles las bombas de trasiego al punto de inyección, se puede filtrar hacia él con las bombas de filtrado desde tanque # 9 hacia el punto de inyección.

- Etapa 5. Almacenamiento final e inyección a la capa

Esta agua bombeada hacia el punto de inyección de Cárdenas se recibe en el tanque # 4 por la toma superior del mismo ubicada a 1,30 m del fondo del tanque para evitar remover los sedimentos que quedan depositados. Una vez llenado el tanque, se deja en reposo por 4 horas, posteriormente se muestrea el tanque por niveles y se determina visualmente la presencia de hidrocarburos. En caso de la existencia de los mismos, se debe extender el proceso de reposo por el tiempo necesario. Cuando se logre determinar que las fases están bien separadas se comunica el tanque # 4 con tanque # 5. Una vez cumplido el requisito anterior, se comienza el proceso de inyección al pozo. Al comenzar dicho proceso, el operador revisa el toma muestras superior con una frecuencia de una hora y en caso de detectar turbidez en el agua, detiene de inmediato la operación.

Para la inyección de agua al pozo se cuenta con dos bombas *Goulds*, una bomba *MGR* y una bomba *Applex*. La cantidad de bombas trabajando, así como el caudal de bombeo al pozo, están en dependencia de la presión de inyección la que no debe ser superior a las 45 atm.

En ausencia de las bombas *Goulds* por rotura u otra causa, se utilizarán equipos de bombeo alternativos para resolver la necesidad de inyección que impone el tratamiento en Batería Central.

2.1.1 Levantamiento físico del ducto y caracterización de los parámetros técnicos - operacionales

El levantamiento físico de la infraestructura de transporte del agua residual de la EPEP Centro, se realiza desde la Batería Central hasta la Batería de Cárdenas. Dicho levantamiento se lleva a cabo a partir de las fichas técnicas, manuales y parámetros de diseño de la misma, así como de observaciones y mediciones reales en el campo. Se cuenta además, con la herramienta *Google earth*, la cual brinda una vista satelital de dicha infraestructura (ver anexo 3).

La veracidad de los datos es muy importante ya que cualquier cambio que ocurra en el diámetro, elevación y dirección del ducto, influye directamente en la caída de presión del fluido.

El sistema de tratamiento y disposición del agua residual de dicha Empresa, no es un proceso continuo, en ocasiones no hay producción de aguas residuales en ninguna de las áreas del proceso productivo y está detenida tanto la recepción de la misma, como su inyección al pozo.

En la Batería Central, los parámetros de operación del sistema de residuales son regulados desde una sala de control, mediante el Sistema Supervisor SCADA (WinCC) debido a que este proceso se encuentra automatizado. A continuación se muestran dichos parámetros:

- Nivel de los tanques mediante los manómetros de superficie.
- Volumen de agua residual bombeada hacia la Batería de Cárdenas, el cual es estimado a partir de la diferencia de nivel en el tanque 5 y se reporta un valor diario.
- Tiempo de bombeo y cantidad de bombas trabajando
- Presión de salida de las bombas, la cuales reportada minuto a minuto mediante un manómetro de presión o transmisor de presión (TP) ubicado en la línea de salida del agua residual de la estación de bombas.
- Temperatura del agua en los tanques (EPEP Centro, 2014).

En el caso de la Batería de Cárdenas, los parámetros operacionales controlados son:

- Nivel del tanque que recepciona el agua proveniente de la Batería Central. Este es verificado a través del manómetro ubicado en la parte inferior del tanque por un operador. Cuando el tanque alcanza el nivel máximo, se detiene el bombeo y se cierra la entrada.
- Presión de entrada del agua residual, se reporta un valor diario de la misma cuando el proceso se encuentra estable (continuo).
- Temperatura, caudal y presión del agua de inyección durante el proceso de inyección al pozo. Se realiza un registro cada dos horas (EPEP Centro, 2014).

Los valores de dichos parámetros, se obtienen a partir de los reportes realizados por el Departamento de Tecnología de la EPEP Centro.

2.2 Obtención del modelo de simulación

La simulación del sistema de transporte de agua residual de la EPEP Centro, se lleva a cabo tomando como puntos de referencia inicial y final, la unión de los flujos a la salida de las bombas *Goulds* ubicadas en la estación de bombas de la Batería Central y la llegada del agua residual a la Batería de Cárdenas respectivamente.

Para ello, se cuenta con un *software* simulador de flujos que contiene una amplia gama de correlaciones matemáticas y empíricas. Para el empleo del mismo se debe tener previamente un conocimiento detallado del perfil topográfico de la tubería y del fluido a simular. Las propiedades y características que se tienen en cuenta de este último son: porcentaje de agua, y relación gas – petróleo, además de la gravedad específica y gravedad API del mismo. Estas dos últimas son reportadas, por defecto en el *software* para condiciones estándar (ver anexo 4).

A continuación se explica cómo se introducen los datos en la herramienta de simulación:

2.2.1 Selección de la correlación de flujo

La selección de la correlación de flujo depende de la fase en la que se encuentre el fluido y de la dirección del flujo.

En este caso el fluido se encuentra en fase líquida y la dirección del flujo se considera horizontal por no tener el acueducto cambios de niveles con ángulos mayores a 45° en su trayectoria.

Se selecciona la correlación de flujo *Moody*, debido a que se emplea en la simulación de fluidos con las características mencionadas anteriormente y además, es la correlación recomendada por Schlumberger (2010) para flujo monofásico.

2.2.2 Datos del perfil topográfico

Primera mente se introducen en el *software* los datos generales de la línea de flujo como son: distancia horizontal, diámetro interno, espesor y rugosidad de la misma, en la descripción: Vista simple.

El diámetro interno se calcula a partir de la siguiente relación (Gótera, 2008):

$$\emptyset_{interno} = \emptyset_{externo} - 2 \cdot STD \quad \text{ec.2.1}$$

Donde:

$\emptyset_{\text{interno}}$: Diámetro interno (mm)

$\emptyset_{\text{externo}}$: Diámetro externo (mm)

STD: Espesor estándar (mm)

Teniendo en cuenta el diámetro nominal de la tubería, se determina el diámetro externo y el espesor para tuberías estándares según la Norma ANSI B 36.10-1979 expuesta en Trouvay y Cauvin (1983).

En el caso de la rugosidad, esta propiedad se encuentra por defecto en el software para tuberías de acero al carbono.

Posteriormente se incluyen los valores de distancia con su elevación correspondiente, la temperatura ambiental (si la tubería se encuentra en el mismo medioambiente se puede introducir el primero y el último valor) y el valor del coeficiente de transferencia de calor en la descripción: Vista Detallada (ver anexo 5).

En el caso del coeficiente de transferencia de calor (valor U), se selecciona la opción de ser calculado por el software en el *tab* de transferencia de calor debido a que se desconoce el valor del mismo (ver anexo 6).

En este *tab*, se incluye además el material de la tubería mediante el valor de la conductividad térmica para el acero al carbono, y se selecciona el tipo de fluido ambiental, dejando por defecto la velocidad del mismo así como la conductividad del terreno (Schlumberger, 2010).

La presencia de válvulas y accesorios fueron añadidas al software mediante las longitudes equivalentes específicas para cada tramo, a partir de la siguiente ecuación expuesta por Levenspiel (1993).

$$L_{\text{Total}} = L_{\text{Tuborecto}} + L_e \quad \text{ec.2.2}$$

Donde:

L_{Total} : Longitud total del tramo (m)

$L_{\text{Tuborecto}}$: Longitud física del tramo (m)

L_e : Longitud equivalente (m)

La longitud equivalente se determina según la metodología propuesta por Cabrera (1987).

El procedimiento visto anteriormente se realiza para los distintos tramos de tubería ya que la misma presenta diferentes diámetros, realizando, mediante nodos, la conexión de los mismos (ver anexo 7).

2.2.3 Validación del modelo de simulación

Para la validación del modelo de simulación se lleva a cabo un ajuste al caso base y un análisis de sensibilidad. Para la realización de los mismos, se realiza primeramente un análisis estadístico de los datos.

2.2.3.1 Análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico se realiza a las variables de operación empleadas en la simulación del proceso, estas son el flujo y las presiones de entrada y de salida del mismo. Dicho análisis comprende la determinación del tipo de distribución que presentan los datos y el cálculo de los principales parámetros de la estadística descriptiva. Este análisis se realiza empleando la herramienta Análisis de Datos del programa *Microsoft Excel* y el software *Stargraphics*. La data de valores empleada corresponde al mes de marzo del año 2015, obtenida a partir de la caracterización de los parámetros técnicos – operacionales realizada en el epígrafe 2.1.1.

El flujo se determina a partir de los valores diarios de volumen de agua bombeada y las respectivas horas de trabajo de los equipos de bombeo mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{ec.2.3}$$

Donde:

Q = Flujo de agua (m³/h)

V = Volumen de agua bombeada (m³)

t = Tiempo de bombeo (h)

En el caso de las presiones de entrada al sistema (presiones de descarga de las bombas) se hace necesario primeramente calcular el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad en cada día (debido a que se cuenta con una data de valores minuto a minuto durante 31 días) para obtener un valor diario. Este análisis estadístico se realiza solamente a los valores mayores que 1 atm, debido a que valores inferiores, indican que las bombas en ese momento no se encuentran bombeando. Posteriormente, se toman solamente los valores promedios diarios en los cuales, el coeficiente de variabilidad sea menor que el 12% y los coeficientes de asimetría y curtosis estándar se encuentren en el rango de -2 a 2, lo cual indica que dicho valor promedio, es representativo del proceso, obteniéndose así una muestra de valores en el mes.

Debido a que se cuenta con un valor diario de presiones de salida del proceso (llegada del agua residual a la Batería de Cárdenas) y de flujo de agua bombeada durante el mes de marzo del 2015, se toman los valores del día correspondiente a los resultados obtenidos en el análisis estadístico realizado a las presiones de entrada, visto anteriormente.

Una vez realizado este análisis previo, se determina un valor promedio de flujo, así como de las presiones de entrada y de salida en el mes, verificando que se cumplen los parámetros estadísticos abordados anteriormente, y con dichos valores se lleva a cabo la realización del ajuste al caso base.

El coeficiente de variabilidad (CV) se determina a partir de la siguiente relación:

$$CV = \frac{DE}{M} \cdot 100 \quad \text{ec.2.4}$$

Donde:

DE = Desviación estándar

M = Media aritmética

2.2.3.2 Ajuste al caso base

El ajuste al caso base se lleva a cabo a partir de la simulación del proceso con las condiciones actuales de operación y diseño, tomando como datos, los resultados obtenidos en el análisis estadístico.

Para ello primeramente se fijan las variables flujo y presión de salida y posteriormente se calcula la presión de entrada a partir de un análisis del perfil presión contra distancia total. Dicho análisis se encuentra disponible en la opción de operaciones de la barra menú. En este perfil se incluye además, la elevación de la tubería. Es necesario aclarar que el flujo de operación debe ser convertido a m^3/d , para introducir el dato en el software debido a que la unidad en el Sistema Internacional m^3/h no aparece en el mismo.

Los resultados ofrecidos en la simulación, son comparados con los datos registrados por la Empresa en el histórico, verificando que el porcentaje de error relativo, calculado a partir de la siguiente expresión, sea menor al 10%.

$$E = \frac{P_{e_{med}} - P_{e_{cal}}}{P_{e_{med}}} \cdot 100 \quad \text{ec.2.5}$$

Donde:

E: Error relativo (%)

$P_{e_{med}}$: Presión de entrada al sistema medida (Pa)

$P_{e_{cal}}$: Presión de entrada al sistema calculada (Pa)

2.2.3.3 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad también se realiza un análisis del perfil presión contra distancia total, pero en este caso, variando el flujo con valores superiores e inferiores al flujo actual de operación.

- Variable fija: Presión de entrada
- Variable calculada: Presión de salida
- Datos de sensibilidad:
 - Objeto: Sistema de flujo (*System data*)
 - Variable: Flujo
 - Unidad de medida: m^3/d
 - Valores: 1000, 2000, 4000, 6000, 10 000.

Los datos ofrecidos por el simulador deben ser consecuentes con los resultados esperados en el proceso.

2.3 Diseño del sistema de flujo

Este epígrafe tiene como objetivo la realización de un diseño factible de la infraestructura de transporte del agua residual de la EPEP Centro, que permita disminuir los costos de inversión y de mantenimiento. Para ello se quiere proponer un sistema de flujo homogéneo mediante la selección del diámetro de tubería necesario en todo el proceso, a partir de la evaluación del sistema de flujo actual. El estudio se complementa, además, con la selección del material de tubería adecuado que permita disminuir los problemas de corrosión y por último, el análisis de factibilidad económica de la propuesta.

2.3.1 Evaluación del sistema

La evaluación del sistema de flujo actual y del sistema de flujo propuesto se realiza tomando como punto inicial de referencia, la entrada de las bombas *Goulds* ubicadas en la estación de bombas de agua residual de la Batería Central y como punto final, la llegada de la misma a la Batería de Cárdenas. Dicha evaluación se lleva a cabo a partir de la ecuación del balance de energía mecánica y teniendo en cuenta los criterios de selección de bombas respectivamente. Los cálculos necesarios en la misma, se realizan con la ayuda del software *Microsoft Excel*.

2.3.1.1 Sistema actual

Balance de energía mecánica:

$$Z_1 + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + H_S = Z_2 + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + h f_T \quad \text{ec.2.6}$$

Donde:

Z_1 y Z_2 : Puntos de referencia inicial y final con respecto al nivel del mar (m)

α_1 y α_2 : Coeficientes de corrección de la energía cinética. Se determinan a partir del régimen de flujo en la fig.3.4 del Rosabal (2006; p77).

(Se considera $\alpha = 1$ para régimen turbulento y $\alpha = 2$ para régimen laminar).

v_1 y v_2 : Velocidad del fluido a la entrada y salida del sistema (m/s).

P_1 y P_2 : Presión de entrada y salida del sistema (Pa)

h_{fT} : Pérdidas por fricción totales (m)

H_s : Carga requerida por el sistema (m)

ρ : Densidad del agua (kg/m^3). Se determina a partir de los resultados obtenidos en la caracterización físico – química del agua residual.

g : aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$)

Régimen de flujo (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{ec.2.7}$$

Donde:

Re: número de Reynolds (adimensional)

D: diámetro de la tubería (m)

μ : viscosidad del agua (Pa·s). Se determina a partir de la temperatura de la misma en la Tabla 5 del Rosabal (2006; p277).

Área de la sección transversal:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad \text{ec.2.8}$$

Donde:

A: Área de la sección transversal (m^2)

Velocidad del fluido


$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{ec.2.9}$$

Donde:

V: Velocidad del fluido (m/s)

Q: Flujo de operación (m^3/s)

Pérdidas por fricción:

 En tuberías:

$$h_{f \text{ tub}} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad \text{ec.2.10}$$

Donde:

L = Longitud de la tubería (m)

f = Factor de fricción. Se determina en la figura 3.9 del Rosabal (2006; p89) a partir del número de Reynolds y de la rugosidad relativa (ϵ).

$$\epsilon = \frac{e}{D} \quad \text{ec.2.11}$$

Donde:

e: Rugosidad absoluta (mm). Este valor depende del tipo de tubería y se determina en la Tabla 9 del Rosabal (2006; p281).

✚ En accesorios:

$$h f_{acc} = \frac{\sum K \cdot v^2}{2 \cdot g} \quad \text{ec.2.12}$$

Donde:

K = Coeficiente de resistencia del accesorio. Se determina en la Tabla 3.1 del Rosabal (2006, p102).

El procedimiento descrito se realiza para cada tramo del ducto, ya que el mismo presenta diferentes diámetros, lo cual trae consigo que varíe el área de la sección transversal y por tanto la velocidad del fluido.

✚ Pérdidas por fricción totales:

Las pérdidas por fricción totales ($h f_T$) a tener en cuenta en el cálculo de la carga requerida por el sistema, van a estar dadas por la suma de todas las pérdidas en la tubería ($h f_{tub_T}$) y en los accesorios ($h f_{acc_T}$), tal como se muestra a continuación:

$$h f_T = h f_{tub_T} + h f_{acc_T} \quad \text{ec.2.13}$$

Carga requerida por el sistema (H_s):

$$H_s = Z_2 - \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + h f_T - Z_1 - \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} - \frac{P_1}{\rho \cdot g} \quad \text{ec.2.14}$$

Carga neta de succión positiva: Se determina para comprobar la ocurrencia del fenómeno de cavitación de la bomba.

$$NPSH_s = \frac{P_{succ} - P_v}{\rho \cdot g} \quad \text{ec.2.15}$$

Donde:

$NPSH_s$: Carga neta de succión positiva del sistema

P_{succ} : Presión de succión de la bomba (Pa).

P_v : Presión de vapor del agua (Pa). Se determina en función de la temperatura del agua en la Tabla 16 del Rosabal (2006, pág. 290)

Criterios de evaluación de bombas: Para evaluar el adecuado funcionamiento de las bombas, se tienen en cuenta los cuatro criterios imprescindibles para validar el funcionamiento de los sistemas de flujo:

- $H_b > H_s$
- $Q_b > Q_s$
- $NPSH_s > 0$
- $NPSH_b \leq NPSH_s$

Donde:

H_b : Carga de diseño de la bomba para el flujo de operación. Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba (ver anexo 8)

Q_b : Flujo máximo de diseño de la bomba. Se determina a partir de los datos brindados por el fabricante en la ficha técnica de la misma.

Q_s : Flujo de operación del sistema. Se considera la mitad del flujo de operación del sistema ya que se encuentran dos bombas funcionando en paralelo según Rosabal (2006 pág. 268)

$NPSH_b$: Carga neta de succión positiva de la bomba: Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba (ver anexo 8)

$NPSH_s$: Carga neta de succión positiva del sistema. Se calcula a partir de la ecuación 2.15.

Consumo de potencia (N)

$$N = \frac{H_s \cdot Q_s \cdot \rho \cdot g}{\eta} \quad \text{ec2.16}$$

Donde:

η : Eficiencia de la bomba. Se determina a partir del gráfico de curvas características específico de la bomba (ver anexo 8).

2.3.1.2 Sistema propuesto

Debido a que se quiere diseñar un sistema de flujo con un solo valor de diámetro de tubería, se propone la evaluación de diferentes sistemas teniendo en cuenta los diámetros nominales de tuberías existentes (4", 6", 8", 10", 12", 14", 16" y 18"). Para dicha evaluación es necesario, previamente, seleccionar el material adecuado para la instalación, teniendo en cuenta que la propuesta técnica económica dependerá de las propiedades y características del mismo.

Selección del material de la tubería

Para la selección del material de la tubería se analiza:

- la influencia de los factores externos en la velocidad de corrosión según la bibliografía especializada (Dominguez, *et al* 1987).
- la composición físico - química del agua residual. Las determinaciones analíticas se desarrollan en el Laboratorio Central de la EPEP Centro. Los resultados son comparados con los valores permisibles (Ministerio de la Protección Social, 2010).
- el carácter corrosivo o incrustante del agua. Este indicador se determina a partir del Índice de Ryznar (*IR*), el cual permite predecir el comportamiento de la misma para asegurar la protección del sistema (De Sousa *et al*, 2010).

Este índice se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$IR = 2 \cdot pH_s - pH \quad \text{ec.2.17}$$

Donde:

pH: El pH del agua

pH_s: El pH de saturación calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$pH_s = 11,017 + 0,197 \log(STD) - 0,995 \log(Ca^{+2}_T - 0,016 \log(Mg^{+2})_T - 1,041 \log(\text{Alcalinidad})_T + 0,021 \log(SO_4^{-2})_T) \quad \text{ec.2.18}$$

Donde:

SDT: Sólidos Disueltos Totales (mg/L)

T: Concentración analítica total (mg/L)

Si $IR < 6$, indica que el agua es incrustante

Si $6 < IR < 7$, indica que el agua está cercana al equilibrio

Si $IR > 7$, indica que el agua es corrosiva.

Si el resultado corresponde a agua que presenta tendencia corrosiva o incrustante, se debe revisar y mejorar el proceso de tratamiento del agua hasta que esta quede totalmente balanceada.

En la selección del material de las tuberías, hay que tener en cuenta, además, otras especificaciones como la selección de los accesorios que se utilizarán en el proceso (Domínguez, 1987).

Balance de energía mecánica:

Para evaluar los sistemas propuestos, y luego de haber seleccionado el material adecuado, se sigue la metodología descrita para la evaluación del sistema instalado (epígrafe 2.3.1.1).

Al unificar el diámetro de la tubería, se desconocen las presiones de salida de los sistemas propuestos, por lo que es necesario aplicar el siguiente procedimiento para la determinación de las mismas.

A partir del modelo de simulación obtenido, se realiza un análisis del perfil presión contra distancia total, teniendo en cuenta los datos actuales de operación y las siguientes variables:

- Variables fijas: Flujo y presión de entrada
- Variable calculada: Presión de salida
- Datos de sensibilidad:
 - Objeto: Línea de flujo
 - Variable: Diámetro interno (ID)
 - Unidad de medida: mm
 - Valores: 102,26; 174,08; 202,74; 254,56; 304,84; 336,54; 387,34; y 437,94
(Valores correspondientes a los diámetros nominales seleccionados para el estudio).

2.3.2 Selección del diámetro de tubería adecuado

La determinación del diámetro de tubería adecuado se realiza por tamizado, teniendo en cuenta criterios técnicos, operacionales y económicos. Los criterios técnicos-operacionales de selección incluyen el análisis del consumo de potencia y la carga requerida por el sistema (epígrafe 2.3.1.1), necesaria para garantizar que la bomba sea capaz de impulsar el fluido hasta el punto final del mismo. Debido a que en este proceso no se requiere, como parámetro operacional, una presión específica de salida, la caída de presión del fluido no será un aspecto esencial a tener en cuenta en esta selección.

El criterio económico se fundamenta en el análisis del costo actual de las tuberías a partir de la siguiente relación:

$$Costo_{2013} = \frac{Costo_{1990} * CEP CI_{2013}}{CEP CI_{1990}} \quad \text{ec.2.19}$$

Donde:

Costo₂₀₁₃: Costo actual de las tuberías (\$)

Costo₁₉₉₀: Costo estimado de las tuberías para el año 1990 (\$)

CEPCI₂₀₁₃: Índice de costo para el año 2013

CEPCI₁₉₉₀: Índice de costo para el año 1990

La estimación del costo de las tuberías para el año 1990, se realiza teniendo en cuenta los diámetros nominales y el material de las mismas a partir de los nomogramas propuestos por Peters, (1991).

Los índices de costos de los años 1990 y 2013 son reportados en la guía de costos de la Industria Química (Chemical Cost Guide, 2013).

2.4 Análisis de factibilidad económica

El análisis técnico-económico preliminar permite proponer el sistema de flujo factible, teniendo en cuenta que, como criterio de selección, el diseño adecuado será aquel que satisfaga los requerimientos técnicos del proceso y que a su vez sea el más económico posible.

Para el análisis de factibilidad se comparan los costos involucrados en la inversión y mantenimiento de los sistemas actual y el propuesto. Además, se determina la relación Beneficio-Costo como complemento del análisis.

2.4.1 Sistema de flujo actual

Inversión inicial:

Para el cálculo de la inversión inicial del sistema de flujo en el año de su instalación (1993) se tiene en cuenta los costos de las tuberías de acero al carbono y de las válvulas.

$$I_{sist actual} = Costo_{tub} + Costo_{válv} \quad ec.2.20$$

Los costos de las tuberías y de las válvulas en ese año se determinan a partir de la siguiente relación:

$$Costo_{1993} = \frac{Costo_{1990} * CEP CI_{1993}}{CEP CI_{1990}} \quad ec.2.21$$

Donde:

Costo₁₉₉₀ y Costo₁₉₉₃: Costos en el año de instalación (\$)

Costo₁₉₉₀: Costo estimado en el año 1990 (\$)

CEPCI₁₉₉₃: Índice de costo del año 1993

CEPCI₁₉₉₀: Índice de costo del año 1990

La estimación del costo de las tuberías y de las válvulas para el año 1990, se realiza a partir de los nomogramas propuestos por Peters (1991) y los índices de costos se obtienen según Chemical Cost Guide (2013).

Mantenimiento

El costo de mantenimiento del sistema actual en un año de explotación (C_{M-1}) se reporta en el informe económico de la EPEP Centro (2015 b).

Si este mantenimiento se realizara durante todo el tiempo de vida útil estimado (t) para la instalación propuesta, se obtendría el costo total de mantenimiento del sistema de flujo actual (C_{M-10}) en que se incurriría en ese período.

$$C_{M-10} = C_{M-1} * t \quad (\$/a)$$

ec.2.22

Para la base de cálculo de los costos de la instalación propuesta se considera como tiempo de vida útil 10 años.

2.4.2 Sistema de flujo propuesto

Inversión Inicial

La inversión inicial del sistema de flujo propuesto ($I_{sist\ prop}$) se calcula según la metodología descrita en el epígrafe 2.4.1, teniendo en cuenta el costo de la tubería del material seleccionado y el costo de las válvulas propuestas, para el año 1990 (año de referencia) y para el año en que se desea obtener la estimación (año más actualizado).

Mantenimiento:

Se valora la necesidad o no de dar mantenimiento a este sistema propuesto.

2.4.3 Relación Beneficio-Costo

Para comprobar el análisis de factibilidad económica de la propuesta se emplea el método beneficio-costos (B/C), al evaluar los costos de reemplazo de la instalación actual o costos evitados por mantenimiento y reparación:

$$\frac{B}{C} = \frac{C_{M-10} - I_{sist\ prop}}{I_{sist\ prop}}$$

Si $B/C > 1$ El proyecto evaluado es económicamente ventajoso.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los principales resultados obtenidos luego de aplicar la metodología expuesta en el Capítulo 2. Se abordan los aspectos relacionados con la descripción tecnológica del proceso, la obtención del modelo de simulación y el diseño del sistema de flujo de la infraestructura de transporte del agua residual de la EPEP Centro.

3.1 Parámetros y características de la infraestructura de transporte del agua residual de la EPEP Centro

Como primera etapa y para iniciar la investigación fue necesario realizar el levantamiento físico y la caracterización de los parámetros técnicos – operacionales del ducto que transporta el agua residual de la EPEP Centro, desde la Batería Central hasta la Batería de Cárdenas. La descripción tecnológica del sistema de flujo fue descrita en el epígrafe 2.1.

3.1.1 Características físicas del ducto

El material del conducto objeto de estudio, es de acero al carbono y presenta una longitud aproximada de 10 263 m. La mayor parte de la línea está dispuesta de forma aérea, con soportes de hormigón, los cuales se encuentran ubicados cada 10 m aproximadamente. Sin embargo existen pequeños tramos de tubería soterrados que corresponden a zonas de acceso vial. En el anexo 3 se puede observar una vista satelital del mismo.

Esta infraestructura está conformada por tramos de tuberías de diferentes diámetros nominales que oscilan entre 6" y 18" y por una gran cantidad de accesorios debido a los cambios de elevación en el perfil topográfico de la tubería y a la extensión de la misma. La mayor cantidad de dichos accesorios, está representada por codos de 90° debido a la presencia de liras de expansión vertical y horizontal. Las liras de expansión se instalan para minimizar la acción que provocan en las soldaduras las dilataciones y contracciones provocadas por el calentamiento del ducto durante el día y el enfriamiento durante la noche. Esta acción en tramos cortos no es evidente, pero cuando el ducto es largo, las soldaduras pueden sufrir rajaduras por fatiga si las tuberías no cuentan con este tipo de aditamento.

En cuanto a las válvulas, las tres primeras están ubicadas en la Batería Central, y la última en la Batería de Cárdenas, mientras que en el resto de la tubería no existen. Estas válvulas son de compuerta, y las características principales de su servicio son: cierre completo sin estrangulación, operación manual poco frecuente y mínima resistencia a la circulación del fluido (EPEP Centro, 2014).

Además, en la actualidad se observa que fundamentalmente en los tramos cercanos a la costas, el ducto ha sufrido un proceso de corrosión de las tuberías, lo que influye en el remplazo paulatino a intervalos de las mismas sin una fundamentación técnica que satisfaga los requerimientos del transporte del agua por el mismo.

Las especificaciones de los diferentes tramos del conducto, así como la cantidad de accesorios presentes en los mismos, se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Caracterización física del ducto

Tramos de tubería		Accesorios por tramo (U)		
Diámetro nominal	Longitud (m)	Válvulas de compuerta	Codos de 90°	Codos de 45°
10"	11,87	0	1	0
6"	209,35	1	8	2
8"	137,4	0	1	2
16"	547,96	2	13	3
12"	1636,8	0	16	2
10"	384,76	0	0	4
12"	1441,23	0	16	3
16"	275,62	0	0	4
12"	87,86	0	0	2
16"	2289,69	0	24	2
14"	629,45	0	12	3
16"	1256,5	0	0	2
18"	1357,82	1	3	5
Total	10 263	4	110	34

Fuente: EPEP Centro (2014)

3.1.2 Parámetros operacionales

Para la descripción de los parámetros operacionales se consideraron los datos reportados en el informe histórico del proceso, correspondientes al mes de marzo del año 2015 (tabla 3.2).

Tabla 3.2. Parámetros técnicos – operacionales del sistema de flujo

Parámetros medidos	Valores	Unidades
Volumen de agua	500 a 2000	m ³
Tiempo de Bombeo	5 a 14	h
Cantidad de bombas trabajando	2	-
Presión inicial ¹	202650 a 405300	Pa
Presión final ²	101325 a 202650	Pa
Temperatura en tanques de B. Central	40 a 80	°C
Temperatura en tanques de B. de Cárdenas	25 a 30	°C

1- salida de la estación de bombas en la Batería Central

2- entrada del agua residual a la Batería de Cárdenas

Fuentes: EPEP Centro (2015 c, d)

El mayor volumen del agua residual que se almacena en la Batería Central proviene del tratamiento del crudo, proceso que se lleva a cabo a altas temperaturas. Según EPEP Centro (2013) el crudo debe alcanzar una temperatura de 85 °C aproximadamente en el calentamiento inicial del mismo. De ahí las altas temperaturas de dicho residual (40 a 80 °C).

Sin embargo, el agua residual en la Batería de Cárdenas se encuentra a una temperatura cercana a la ambiental (25 a 30 °C) ya que, al no estar aisladas las tuberías, esta sufre un proceso de intercambio de calor o enfriamiento durante el trasvase de la misma por el ducto.

En la Batería Central, la estación de bombas cuenta con tres bombas *Goulds* centrífugas horizontales multietapas (dos en operación y una de reserva), las cuales están dispuestas en paralelo. A continuación se brindan los datos técnicos de dichas bombas.

Tabla 3.3. Especificaciones técnicas de las bombas utilizadas en el sistema

Fabricante	<i>Goulds/ITT</i>
Serie	<i>3196 i-Frame™ Series</i>
Versión	M ti
Carga máxima	175 m
Flujo máximo	264 m ³ /h
Presión máxima	290 psi (100°F)
Size	3x4-8
rpm	2900
Ø im pelente	6 ⁷ / ₈ "

Fuente: EPEP Centro (2014).

3.2 Simulación del sistema de flujo y validación del modelo

Para evaluar el sistema de flujo y proponer el diseño adecuado que permita evitar los problemas actuales se lleva a cabo la simulación del sistema. A continuación se muestran los valores empleados en la obtención del modelo de simulación así como los principales resultados obtenidos a partir de la misma.

3.2.1 Perfil topográfico de la tubería

Para introducir los datos en el software del perfil topográfico se determinó:

Diámetro interno:

En la siguiente tabla se exponen los valores de diámetros internos calculados a partir de los diámetros nominales de los distintos tramos de tubería.

Tabla 3.4. Diámetros internos de los distintos tramos de tubería.

Diámetro nominal	Diámetro externo (mm)	Espesor de pared (mm)	Diámetro interno (mm)
6"	188,3	7,11	174,08
8"	219,1	8,18	202,74
10"	273,1	9,27	254,56
12"	323,9	9,53	304,84
14"	355,6	9,53	336,54
16"	406,4	9,53	387,34
18"	457	9,53	437,94

Fuente: Trouvay y Cauvin (1983).

La rugosidad establecida por defecto en el *software* para tuberías de acero al carbono es de 0,0254 mm y la conductividad térmica de dicho material es de 50 W /m /K.

Longitud total de cada tramo: La relación empleada a partir de la metodología descrita por Cabrera (1987) para determinar la longitud equivalente en dependencia del diámetro de la tubería se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.5. Resistencia equivalente para accesorios de tuberías estándares.

Accesorios	Le/D
Codos de 45 °	15
Codos de 90 °	32
Válvulas de compuerta	7

Fuente: Cabrera (1987).

En la tabla 3.6 se muestran las diferentes longitudes equivalentes añadidas a cada tramo las cuales permitieron determinar la longitud total de los mismos.

Tabla 3.6: Longitudes correspondientes a los distintos tramos de tubería

Diámetro nominal	Longitud física (m)	Longitud equivalente (m)	Longitud total (m)
10"	11,87	8,12	20
6"	209,35	44,65	254
8"	137,4	12,59	150
16"	547,96	193,04	741
12"	1636,8	165,2	1802
10"	384,76	15,24	400
12"	1441,23	169,77	1611
16"	275,62	24,38	300
12"	87,86	9,14	97
16"	2289,69	324,31	2614
14"	629,45	152,55	782
16"	1256,5	69,5	1326
18"	1357,82	81,38	1426
Total	10 263	1269,9	11 533

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Análisis estadístico de los datos

Luego de haber procesado estadísticamente toda la data del mes de marzo del año 2015, se seleccionan los valores que cumplen con la normalidad para obtener una muestra representativa del período evaluado.

A continuación se ofrecen los valores promedios diarios de los datos seleccionados de dicho análisis para llevar a cabo la simulación del proceso y el resumen estadístico de los mismos (tabla 3.7 y 3.8).

Tabla 3.7. Datos de operación para el análisis estadístico.

Días de marzo	Volumen de agua (m ³)	Tiempo de bombeo (h)	Flujo (m ³ /h)	Presión de entrada (Pa)	Presión de salida (Pa)
1	1280	9	142,222	288776,3	182385
4	1154	9	128,222	312182,3	192517,5
7	1480	12	123,333	335284,4	192517,5
10	1440	10	144,000	320187,0	192517,5
16	1940	12,4	156,452	219875,3	121590
20	975	6,3	154,762	303265,7	182385
21	1324	8,5	155,765	290093,5	172252,5
22	1580	10	158,000	283710,0	172252,5
23	742	4,57	162,363	315830,0	192517,5
24	1400	10	140,000	312385,0	192517,5
26	1190	8	148,750	331940,7	192517,5
28	1120	8	140,000	310966,4	192517,5
30	1428	8,5	168,000	298098,2	182385
31	1120	7	160,000	297895,5	182385

Fuentes: EPEP Centro (2015 c, d)

Como las variables analizadas presentan valores de coeficiente de asimetría y curtosis cercanos al rango establecido (-2 a 2) y coeficientes de variabilidad inferior al 12%, se considera que los valores promedios de cada una de ellas, pueden ser tomados como datos representativos del proceso, lo cual valida el uso de los mismos en la simulación del sistema de flujo (tabla 3.8).

Tabla 3. 8. Resumen estadístico de las variables de operación

Estadística descriptiva	Variables		
Parámetros	Flujo (m ³ /h)	Presión de entrada (Pa)	Presión de salida (Pa)
Media	148,705	301463,58	181661,25
Error típico	3,475	7502,21	5034,33
Mediana	151,756	307116,07	187451,25
Moda	140,000	-	192517,50
Desviación estándar	13,004	28070,70	18836,76
Varianza de la muestra	169,103	78796429	354823587
Curtois	-0,380	2,05	-2,32
Coefficiente de asimetría	-0,555	-1,917	-2,55
Rango	44,667	115409,17	70927,5
Mínimo	123,333	219875,25	121590
Máximo	168,000	335284,42	192517,5
Suma	2081,869	4220490,22	2543257,5
Cuenta	14	14	14
Nivel de confianza (95,0%)	7,508	16207,541	10876,02
Coefficiente de variabilidad (%)	8,745	9,311	10,369

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Ajuste al caso base

Para la simulación del proceso con las condiciones actuales de operación y diseño, se tomaron los valores promedios obtenidos en el análisis estadístico.

Variables fijas:

- Flujo: $148,705 \text{ m}^3/\text{h} = 3568,92 \text{ m}^3/\text{d}$
- Presión de salida: $181661,250 \text{ Pa}$

Variable calculada:

- Presión de entrada

A partir de la simulación con estos valores se obtuvo el siguiente gráfico:

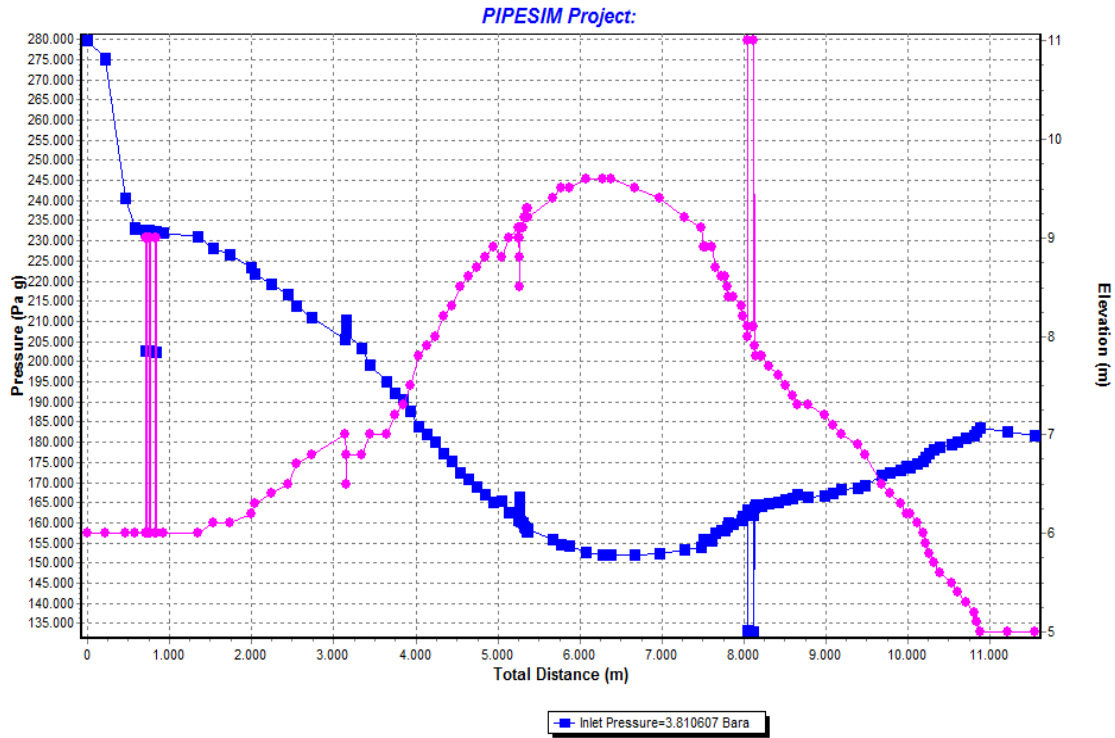


Figura 3.1. Gráfico presión vs distancia total correspondiente al perfil topográfico de la tubería.

Leyenda:

- - Perfil topográfico de la tubería (m)
- - Presión del fluido (Pa)

Resultados ofrecidos por la simulación:

La disminución de la presión del fluido se ve más afectada en el primer tramo de la tubería, el cual se corresponde con el tramo de menor diámetro presente en la misma (174,08 mm). Otro aspecto que influye significativamente en dicho parámetro, son los cambios bruscos de dirección del fluido debido a la presencia de las liras de expansión horizontal y vertical. Fundamentalmente estas últimas pueden ser observadas claramente en la figura 3.1.

La longitud real de la tubería es de 10 263 m aproximadamente, sin embargo en la simulación (fig. 3.1) se obtiene una longitud total de 11 532 m debido a las longitudes equivalentes añadidas en cada tramo. De igual forma se obtiene en la simulación una caída de presión de 93 362 Pa, que corresponde a una presión calculada a la entrada del sistema de 275 023,25 Pa.

Comparando la presión de entrada medida en el proceso con la calculada en la simulación, se obtiene el siguiente error relativo:

Tabla 3.9. Error relativo de la presión de entrada al sistema

Parámetros medidos			Parámetros calculados	
Flujo (m ³ /d)	Presión de salida (Pa)	Presión de entrada (Pa)	Presión de entrada (Pa)	Error relativo (%)
3568,92	181 661,25	301 463,59	275 023,25	8,77

Fuente: Elaboración propia

El error relativo (8,77%), entre la presión de entrada al sistema medida y la calculada para valores fijos de flujo y presión de salida, es aceptable ya que el mismo es inferior al 10%.

3.2.4 Análisis de sensibilidad

Los datos empleados para el análisis de sensibilidad se muestran a continuación:

Variables fijas:

- Flujo: 148,705 m³/h = 3568,92 m³/d
- Presión de entrada: 301463,59 Pa

Variable calculada:

- Presión de salida

Datos de sensibilidad:

- Objeto: Sistema de flujo (*System data*)
- Variable: Flujo
- Unidad de medida: m³/d
- Valores: 1 000, 2 000, 4 000, 6 000, 8 000 y 10 000.

A partir de la simulación realizada para distintos valores de flujo, se obtienen diferentes curvas para la caída de presión del fluido (figura 3.2):

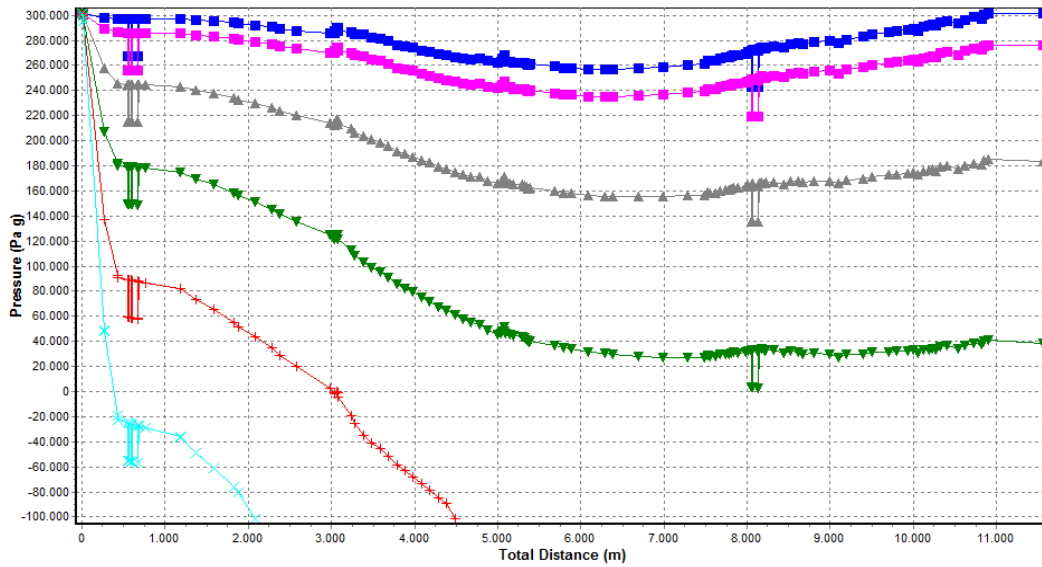


Figura 3. 2. Gráfico presión vs distancia total para distintos valores de flujo.

De estos resultados se obtiene la presión de salida y la caída de presión en los diferentes sistemas (tabla 3.10).

Tabla 3.10. Caída de presión del fluido para distintos valores de flujo

Leyenda	Flujo (m ³ /d)	P salida (Pa)	Δ P (Pa)
■	1 000	301 387,38	76,21
■	2 000	275 941,48	25 522,11
■	4 000	183 676,21	117 787,38
■	6 000	383 86,46	26 3077,13
■	8 000	-101 324,99	402 788,58
■	10 000	-101 324,99	402 788,58

Fuente: Software Pipesim

Estos resultados son consecuentes con los reales en el proceso debido a que el flujo actual de operación (3568,92 m³/d) provoca una caída de presión de 119 802 Pa, la cual se encuentra cercana al rango de flujo visto anteriormente de 2 000 a 4 000 m³/d (la pequeña diferencia radica en el error relativo). Como se puede apreciar, a mayor flujo, mayor caída de presión del fluido. Además, se demuestra que esta simulación es válida para flujos menores y mayores que los flujos actuales de operación.

Debido a los resultados obtenidos en el ajuste al caso base y el análisis de sensibilidad, queda validado el modelo de simulación de la infraestructura de transporte de agua residual de la EPEP Centro.

3.3 Evaluación del sistema de flujo actual

Para evaluar el sistema de flujo es necesario aplicar la ecuación del balance de energía mecánica y definir los parámetros del modelo: altura, velocidad, coeficiente de corrección, presiones, pérdidas por fricciones y propiedades del fluido (ρ y μ). En la siguiente tabla se muestran dichos datos:

Tabla 3.11. Propiedades del fluido, datos de operación y diseño

Parámetros	Valores	Unidades
Flujo (Q)	149	m ³ /h
Viscosidad (μ)	0,654 · 10 ⁻³	Pa · s
Densidad (ρ)	1 020	kg/m ³
Gravedad (g)	9,8	m /s ²
Presión inicial (P ₁)	50662,5	Pa
Presión final (P ₂)	182385	Pa
Altura inicial (Z ₁)	6	m
Altura final (Z ₂)	5	m
Diámetro inicial (D ₁)	0,1016	m
Diámetro final (D ₂)	0,4572	m

Fuente: EPEP Centro (2015 a, c)

A continuación se muestran los resultados obtenidos de cada parámetro en la evaluación del sistema de flujo:

Análisis de los parámetros en los puntos de referencia del sistema

Tabla 3.12. Parámetros en los puntos de referencia inicial (1) y final (2)

Parámetros	Valores iniciales ₍₁₎	Valores finales ₍₂₎	Unidades
Área de la sección transversal (A)	0,008	0,164	m ²
Velocidad del fluido (v)	5,107	0,252	m /s
Número de Reynolds (Re)	809 360	179 857	-
Coefficiente de corrección (α)	1	1	-

Fuente: Elaboración propia

El número de Reynolds es superior a 4000 en ambas condiciones, por lo que se considera régimen turbulento y por tanto el valor del coeficiente de corrección de la energía cinética es igual a la unidad (Rosabal, 2006).

Debido a que el flujo está representado por un número de Reynolds elevado, los efectos viscosos son relativamente poco importantes y no influyen significativamente en la disipación de energía (Levespiel, 1993). Por este motivo se asume que la viscosidad del fluido es similar a la del agua.

Debido a que el diámetro final de la tubería es mayor, el área de la sección transversal aumenta; por tanto disminuye la velocidad del fluido y como consecuencia el valor del régimen de flujo. Estas relaciones se pueden apreciar en las ecuaciones 2.8 y 2.9 del capítulo 2 respectivamente.

Análisis de los parámetros en los tramos de tubería

Según los valores del número de Reynolds (tabla 3.13), el régimen es turbulento en todo el sistema de flujo.

Tabla 3.13. Pérdidas por fricción en tuberías

\emptyset nominal	\emptyset (m)	L (m)	A (m ²)	v (m/s)	Re	ϵ (10 ³)	f	hf tuberías (m)
10"	0,25	11,87	0,05	0,81	323 744	0,49	0,0195	0,031
6"	0,15	209,35	0,02	2,27	539 573	8,2	0,021	7,584
8"	0,2	137,4	0,03	1,27	404 680	6,15	0,02	1,125
16"	0,4	547,96	0,13	0,32	202 340	3,07	0,0185	0,129
12"	0,3	1636,8	0,07	0,57	269 786	4,1	0,019	1,676
10"	0,25	384,76	0,05	0,82	323 744	4,92	0,0195	1,006
12"	0,3	1441,23	0,07	0,57	269 786	4,1	0,019	1,476
16"	0,4	275,62	0,13	0,32	202 340	3,07	0,0185	0,065
12"	0,3	87,86	0,07	0,57	174 866	4,1	0,019	0,089
16"	0,4	2289,69	0,13	0,32	202 340	3,07	0,0185	0,541
14"	0,36	629,45	0,1	0,42	231 245	3,52	0,019	0,298
16"	0,4	1256,5	0,13	0,32	202 340	3,07	0,0185	0,297
18"	0,46	1357,82	0,16	0,25	179 857	2,73	0,0185	0,177
								Total: 14,5

Fuente: Elaboración propia

Los tramos de menor diámetro tienen mayores pérdidas por fricción, debido a que la rugosidad en las paredes tiene un mayor efecto en las fuerzas de rozamiento y fricción en la medida que se hace menor el diámetro del conducto. La rugosidad puede afectarse además, por la corrosión y presencia de incrustaciones proporcionadas por la naturaleza del fluido y el material de la tubería (Crane, s/a).

A partir de la sumatoria de las pérdidas por fricción en cada uno de los tramos de la tubería, se obtiene un valor de 14,5 m de pérdidas por fricción totales en el sistema. La presencia de válvulas y accesorios ocasionan pérdidas por fricción debido al cambio de la dirección del flujo en forma total o parcial y la turbulencia que generan, causando una pérdida de energía mayor a la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta (Greene, s/a).

Tabla 3.14. Pérdidas por fricción en válvulas y accesorios

Tramos de tubería Ø nominal	Accesorios por tramo (U)			hf accesorios (m)
	Válvulas de compuerta	Codos de 90°	Codos de 45°	
10 "	0	1	0	0,02
6 "	1	8	2	1,411
8 "	0	1	2	0,083
16 "	2	13	3	0,045
12 "	0	16	2	0,164
10 "	0	0	4	0,027
12 "	0	16	3	0,167
16 "	0	0	4	0,004
12 "	0	0	0	0,006
16 "	0	24	2	0,076
14 "	0	12	3	0,069
16 "	0	0	2	0,002
18 "	1	3	5	0,001
				Total: 2,08

Fuente: Elaboración propia

A partir de la sumatoria de las pérdidas por fricción en cada uno de los tramos de la tubería (tabla 3.14), se obtiene un valor de 2,08 m de pérdidas de carga totales en la misma debida a la presencia de las válvulas y accesorios instalados en el sistema de flujo.

Los coeficientes de resistencia para las válvulas de compuertas abiertas (7), codo de 90° (0,6) y del codo de 45° (0,2) fueron obtenidos de los que reporta Rosabal (2006). Teniendo en cuenta las pérdidas por fricción en tuberías, accesorios y válvulas se obtuvo 16,58 m de pérdidas por fricción total en todo el sistema de flujo.

Carga requerida por el sistema

Al aplicar el balance de energía mecánica con los datos y resultados del sistema actual se obtuvo una carga requerida por el sistema (H_s) de 27,43 m

Carga Neta de Succión Positiva (NPSH_s)

Para una presión de succión de la bomba de 50662,5 Pa y una presión de vapor del agua a 40°C de 7337 Pa, se obtuvo una carga neta de succión positiva del sistema de 4,33 m.

Evaluación de la bomba instalada

Al evaluar los criterios de selección de bombas se obtuvo:

Tabla 3.15. Evaluación de la bomba para el sistema actual

Parámetros	Sistema Actual	Parámetros de diseño
Q (m ³ /h)	74,5	264
H (m)	27,43	55
NPSH	4,33	3

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, se cumple en todos los casos que:

- Carga de la bomba y del sistema: $H_b > H_s$
- Caudal de la bomba y del sistema: $Q_b > Q_s$
- Carga neta de succión positiva del sistema: $NPSH_s > 0$
- Carga neta de succión positiva de la bomba y del sistema: $NPSH_b \leq NPSH_s$

El NPSH y la carga de la bomba fueron obtenidos de las curvas características (anexo 8) con el flujo de operación ($75 \text{ m}^3/\text{h}$) y el diámetro del impelente ($6 \frac{7}{8}$ ").

Al cumplirse todos los criterios de selección, se puede concluir que el sistema actual funciona adecuadamente y que las bombas instaladas satisfacen los requerimientos de operación del proceso.

Potencia consumida por la bomba:

Para una eficiencia de diseño de la bomba de 63% obtenida de las curvas características de las mismas (anexo 8), el consumo de potencia actual de la bomba calculado a partir de la ecuación 2.16 es de 9009 W.

3.4 Diseño del sistema de flujo propuesto

Para proponer un nuevo sistema, donde se homogenicen los diámetros y se eviten los problemas existente de cambios reiterados de los tramos de tubería por deterioro, se hace necesario seleccionar inicialmente el material de las tuberías que serán instaladas.

3.4.1 Análisis y selección de materiales

En este epígrafe se expone la influencia de las condiciones ambientales y de las propiedades del fluido en la selección del material a emplear en el diseño de la infraestructura de transporte de agua residual de la EPEP Centro.

Condiciones ambientales:

La composición del medio gaseoso, es más influyente en la corrosión de materiales como el hierro y el acero. Especialmente influye la presencia de oxígeno, compuestos de azufre y vapor de agua (Domínguez, 1987).

Debido a que los mismos están presentes en las distintas atmósferas que rodean la tubería y teniendo en cuenta la influencia del aerosol marino en los tramos cercanos a las zonas costeras, se considera que las condiciones ambientales favorecen el proceso de corrosión de las tuberías.

Propiedades del fluido:

Los valores obtenidos de las pruebas realizadas *in situ* en el Laboratorio Central de Ensayos Físico – Químicos de la EPEP Centro se muestran en la tabla 3.16.

Tabla 3.16. Caracterización físico – química del agua residual

Parámetros	Valores	Unidades
Sulfuros	2 442	m g/L
Cloruros	19 568	m g/L
Sulfatos	332	m g/L
Bicarbonatos*	3 778	m g/L
Carbonatos *	928	m g/L
Calcio	100	m g/L
Sodio	58	m g/L
Potasio	500	m g/L
Magnesio	108	m g/L
Sólidos en suspensión	132	m g/L
Hidrocarburos	26,4	m g/L
pH	9,5	-
Temperatura	40	°C
Densidad	1 020	kg/m ³
Conductividad	49,3	μS/cm
Alcalinidad total *	3 072	m g/L
Dureza total *	783	m g/L

*Expresada como CaCO₃

Fuente: EPEP Centro (2015 a).

El aumento de la temperatura influye en la velocidad de corrosión de los metales, favoreciendo la oxidación de los mismos. Aunque la temperatura del fluido no se considera elevada, las oscilaciones de este parámetro (comportamiento característico del sistema) también favorecen dicho proceso.

Otro factor que influye en los procesos corrosivos, lo constituye la presencia de los metales (calcio, sodio, magnesio y potasio). La gran mayoría de estos procesos, cuando se efectúan a temperaturas no muy elevadas, poseen un fundamento electroquímico (Domínguez, 1987).

La conductividad es un indicador de presencia de sales, las cuales provocan incrustaciones y corrosión por este concepto. Dicho valor no se considera elevado ya que esta propiedad puede ser aceptable hasta 2400 μS/cm (Ministerio de la Protección Social 2010).

El cálculo del Índice de Ryznar (IR) arrojó un valor de 2,16 lo cual indica, según el criterio de esta metodología, que el agua es incrustante.

Selección del material:

A partir del análisis bibliográfico realizado en el capítulo 1, de la metodología descrita en el capítulo 2 y de los resultados expuestos anteriormente, se selecciona el policloruro de vinilo (PVC), como material a emplear en la tubería encargada de la disposición final del agua residual de la EPEP Centro.

A pesar de que los resultados obtenidos indican que el agua residual no es muy corrosiva, sus características incrustantes pueden favorecer el deterioro de las tuberías. Además, el tiempo de explotación (12 años) supera el tiempo de vida útil estimado (10 años), por lo que se propone el reemplazo del material actual de dicho sistema.

Por otra parte, el PVC presenta las siguientes ventajas (AseTUB, s/a):

- Menor pérdida de carga, debido a la lisura de su superficie interior.
- Inexistencia de depósitos e incrustaciones y ausencia de oxidación y corrosión.
- Elevadas tensiones de diseño, haciendo posible un espesor menor.
- Ligereza que facilita transporte, manipulación e instalación, disminuyendo su costo.
- Mejor comportamiento frente al golpe de ariete, debido a su baja celeridad.
- Resistencia a altas presiones internas (25 bar).
- Estabilidad química del material que impide su descomposición.
- Alta resistencia al fuego. Autoextinguibles. No se funden formando gotas de material en combustión.
- El tiempo de vida útil para las tuberías es superior a 50 años.

3.4.2 Evaluación de los sistemas propuestos

Con el objetivo de determinar las presiones de salida para los diferentes sistemas a evaluar, se llevó a cabo la simulación del proceso a partir de los siguientes datos:

- Variables fijas:
 - Flujo: 3568,92 m³/d
 - Presión de entrada: 301463,59 Pa

- Variable calculada:
 - Presión de salida

- Datos de sensibilidad:
 - Objeto: Línea de flujo
 - Variable: Diámetro interno (ID)
 - Unidad de medida: m m
 - Valores: 102,26; 174,08; 202,74; 254,56; 304,84; 336,54; 387,34; y 437,94
(Valores correspondientes a los diámetros nominales 4", 6", 8", 10", 12", 14", 16" y 18" respectivamente).

A continuación se muestra el gráfico resultante del análisis del perfil presión contra distancia total para los distintos valores de diámetro.

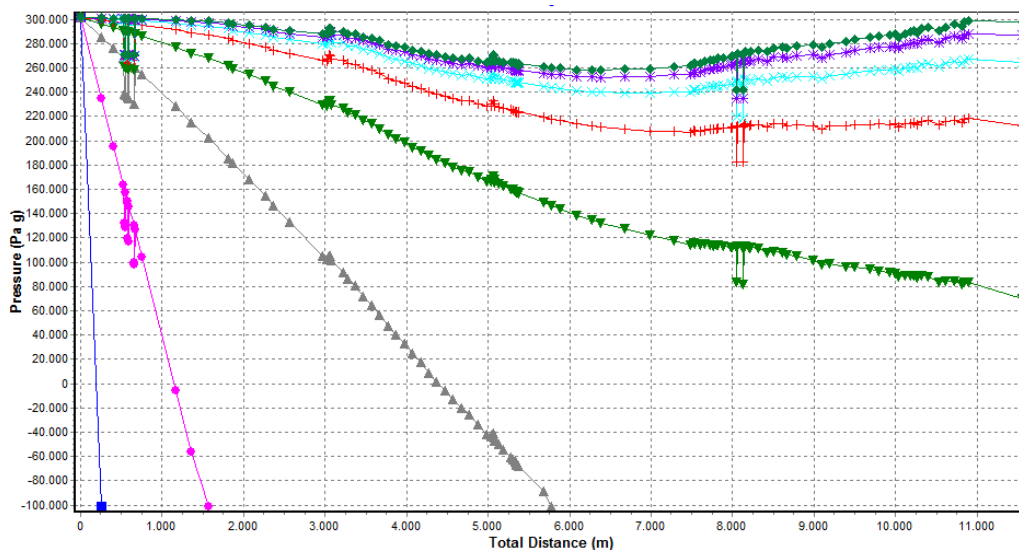










Figura 3.3. Gráfico presión vs distancia total para distintos valores de diámetro.

De estos resultados se obtiene la presión de salida y la caída de presión en el sistema (tabla 3.17)

Tabla 3.17. Presión de salida de los sistemas propuestos

Leyenda	Diámetro nominal	Presión de salida (Pa)	ΔP (Pa)
	4 "	-101 324,99	402765,997
	6 "	-101 324,99	402765,997
	8 "	-101 324,99	402765,997
	10 "	69 751,41	235622,939
	12 "	212 389,69	90664,1442
	14 "	264 679,02	37530,9542
	16 "	286 977,36	14875,0592
	18 "	297 605,73	4077,1672

Fuente: *Software Pipesim*

Debido a que los sistemas de tuberías de 4", 6" y 8" no satisfacen los requerimientos del proceso, no se tendrán en cuenta en la evaluación de los sistemas de flujo.

En la tabla 3.18 se expresan los resultados de los parámetros para la evaluación de los sistemas propuestos a partir de las presiones de salida obtenidas.

Tabla 3.18. Evaluación de los sistemas de flujo propuestos

Parámetros	10 "	12 "	14 "	16 "	18 "
D (m)	0,254	0,305	0,356	0,406	0,457
L (m)	10 263	10 263	10 263	10 263	10 263
e (m)	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$
e/D	$0,19 \cdot 10^{-5}$	$0,16 \cdot 10^{-5}$	$0,14 \cdot 10^{-5}$	$0,12 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$
A (m ²)	0,051	0,073	0,099	0,130	0,164
V (m/s)	0,817	0,568	0,417	0,319	0,252
Re	323 744	269 786	231 245	202 340	179 857
f	0,0120	0,0115	0,0115	0,0110	0,0110
hftub(m)	16,522	6,363	2,944	1,444	0,802
hfacc (m)	2,504	1,207	0,652	0,382	0,239
hf total (m)	19,026	7,571	3,596	1,826	1,040
P ₂ (Pa)	69 751,41	212 389,69	264 679,02	286 977,36	297 605,73
Hs (m)	18,63	21,43	22,68	23,14	23,41

Fuente: Elaboración propia

A medida que aumenta el diámetro, disminuyen las pérdidas por fricción y aumenta la presión de salida del sistema (P_2). Al ser ambos parámetros directamente proporcionales a la carga del sistema, el aumento de la misma se debe a que el aumento de la presión de salida es más significativo que la disminución de las pérdidas por fricción.

Evaluación de bombas

Al comparar los parámetros de diseño de los sistemas propuestos con los de la bomba instalada (tabla 3.19), se cumple que:

- Carga de la bomba y del sistema: $H_b > H_s$
- Caudal de la bomba y del sistema: $Q_b > Q_s$
- Carga neta de succión positiva de la bomba y del sistema:

$$NPSH_b \leq NPSH_s$$

Tabla 3.19. Evaluación de la bomba instalada para los sistemas propuestos

Parámetros de operación	10"	12"	14"	16"	18"	Parámetros de diseño
Q (m ³ /h)	74,5	74,5	74,5	74,5	74,5	264
H (m)	18,63	21,43	22,68	23,14	23,41	55
NPSH (m)	4,33	4,33	4,33	4,33	4,33	3

Fuente: Elaboración propia

El flujo de operación es el mismo en todos los casos, ya que la simulación de estos sistemas se llevó a cabo con las mismas condiciones de operación que el sistema actual para la posterior comparación de los resultados obtenidos en los mismos. Las bombas instaladas satisfacen el flujo de operación con un sobrediseño para este parámetro de 28%.

La carga neta de succión positiva ($NPSH_s$) tiene el mismo valor en los diferentes sistemas ya que esta es función de parámetros que no varían: presión de succión de la bomba, presión de vapor, densidad del agua a la temperatura específica y de la gravedad. Según los resultados del NPSH obtenido, las bombas no cavitan y cumplen con los requerimientos de operación para estos sistemas.

Al cumplirse las restricciones para la carga, el NPSH y el flujo, se puede concluir que las bombas instaladas y los sistemas evaluados satisfacen los requerimientos técnicos operacionales para la propuesta.

Consumo de potencia

El consumo de potencia de la bomba de los sistemas propuestos se determinó teniendo en cuenta el mismo flujo de operación que para el sistema actual y la misma eficiencia de la bomba ya que estas pueden ser empleadas en los sistemas propuestos, lo cual quedó demostrado anteriormente.

Tabla 3.20. Consumo de potencia de la bomba para los diferentes sistemas

Parámetro	10 "	12 "	14 "	16 "	18 "
Potencia consumida por la bomba (W)	6120	7038	7448	7599	7689

Fuente: Elaboración propia

El consumo de potencia es mayor a medida que aumenta el diámetro, ya que este es directamente proporcional a la carga requerida por el sistema. En la medida que aumenta la carga del sistema, mayor es la potencia que debe suministrarse para impulsar el fluido desde el punto inicial al final.

3.4.3 Diámetro de tubería adecuado

Luego de haber definido que todos los sistemas propuestos cumplen con los requerimientos técnicos-operacionales, es necesario realizar una evaluación económica para su selección final, a partir de comparar los costos de los mismos.

Estimación de costos

Los costos obtenidos para el año 1990 a partir de los nomogramas propuestos por Peters (1991) para los distintos sistemas y el costo estimado a partir de la ecuación 2.19 para el año 2013, se muestran en las tablas 3.21 y 3.22 respectivamente.

Tabla 3.20. Costos de las tuberías de PVC (1990)

Diámetro nominal	Costo (\$/m)	Longitud (m)	Costo total (\$)
10"	7,72	10 263	79 257
12"	10,84	10 263	111 306
14"	14,50	10 263	148 848
16"	18,69	10 263	191 883
18"	23,42	10 263	240 411

Fuente: *Peters (1991)

Tabla 3.21. Costos de las tuberías de PVC (2013)

Diámetro nominal	Costo total (\$)
10"	125 734
12"	176 577
14"	236 134
16"	304 405
18"	381 390

Fuente: Elaboración propia

Los índices de costos empleados para el año 1990 y 2013 fueron 357,6 y 567,3 respectivamente (Chemical Cost Guide, 2013).

Selección del diámetro

En la tabla 3.22 se muestran los principales resultados obtenidos en la evaluación del sistema de flujo y el análisis económico de los sistemas propuestos, los cuales permitieron la elección final del mismo.

Tabla 3.22. Criterios empleados para la selección del diámetro adecuado en el proceso.

Parámetros	10"	12"	14"	16"	18"	Sistema actual
H (m)	18,63	21,43	22,68	23,14	23,41	27,36
N (W)	6120	7038	7448	7599	7689	9009
Costo(\$)	125 734	176 577	236 134	304 405	381 390	-

Fuente: Elaboración propia

Al comparar los resultados, se puede apreciar que todos los sistemas propuestos requieren menor carga que el sistema actual, y por tanto, menor consumo de potencia de la bomba para el mismo flujo de operación.

El costo de tuberías es mayor a medida que aumenta el diámetro de las mismas, lo cual tiene sentido ya que el gasto de materiales para su producción es mayor.

Se selecciona el diámetro nominal de 10" como diámetro adecuado de tubería para el sistema de flujo, debido a que este presenta menor carga requerida por el sistema, consumo de potencia de la bomba y costo, en comparación con los otros sistemas.

3.5 Evaluación económica

Los resultados de la evaluación económica por concepto de inversión y mantenimiento realizada al sistema actual y a los sistemas propuestos se muestran a continuación:

3.5.1 Sistema de flujo actual

Costo de las tuberías: En la tabla 3.23 se muestran los costos estimados para las tuberías de acero al carbono en el año 1990 a partir de la metodología propuesta por Peters (1991).

Tabla 3.23. Costo de las tuberías de acero al carbono (1990)

Diámetro nominal	Costo* (\$/m)	Longitud (m)	Costo Total (\$)
10"	20,06	11,87	238
6"	7,97	164,69	1313
8"	13,33	137,4	1832
16"	48,45	309,8	15 010
12"	28,15	1636,79	46 078
10"	20,06	384,76	7717
12"	28,15	1441,23	40 573
16"	48,45	275,62	13 354
12"	28,15	87,86	2473
16"	48,45	2289,69	110 938
14"	37,62	629,45	23 678
16"	48,45	1256,5	60 879
18"	60,65	1357,82	82 358
			Total: 406 441

Fuente: * Peters (1991)

Teniendo en cuenta el costo total de tuberías del sistema actual para el año 1990 (406 441 \$) y los índices de costos 357,6 (1990) y 359,2 (1993); el costo de la tubería en el año 1993 calculado a partir de la ecuación 2.21 es de 408 260 \$.

Costo de las válvulas

Los costos de las válvulas instaladas, determinados a partir de la metodología empleada para el cálculo del costo de las tuberías, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.24. Costo de las válvulas de acero al carbono en los diferentes años

Diámetro nominal	Costo* (\$/U)	Cantidad (U)	Costo total (\$)	
			1990	1993
6"	300	1	300	300
16"	1693	2	3386	3386
18"	2125	1	2125	2125

Fuente: *Peters (1991)

Costo de Inversión:

Teniendo en cuenta los costos de las tuberías y de las válvulas calculados anteriormente, se obtuvo una inversión de 414 097 \$.

Costos de mantenimiento

El costo de mantenimiento y reparación de la infraestructura de transporte del agua residual de la EPEP Centro, durante el año 2014 debido a los problemas de corrosión presentados en la misma, fue de 167 083,98 \$. En dichos costos están incluidos los materiales, mano de obra y gastos indirectos en cada reparación mensual (EPEP Centro 2015 b).

3.5.2 Sistema de flujo propuesto

Costo de las tuberías

El costo de la tubería para el sistema propuesto (125 734 \$) se determinó en el epígrafe 3.5.2 para la selección del diámetro de tubería adecuado.

Costo de las válvulas

Para el sistema propuesto, se emplean el mismo tipo de válvulas que se encuentran instaladas (válvulas de compuerta), ya que estas van a desempeñar la misma función, pero teniendo en cuenta el diámetro nominal de tubería seleccionado para dicho sistema (10").

Teniendo en cuenta el costo estimado de las válvulas en el año 1990 a partir de los nomogramas propuestos por Peters (1991) y el costo calculado para el año 2013 a partir de la ecuación 2.19 con los índices de costos correspondientes se obtiene:

Tabla 3.25. Costo de las válvulas de acero al carbono propuestas

Diámetro nominal	Costo* (\$/U)	Cantidad (U)	Costo total (\$)	
			1990	2013
10"	700	4	2800	4442

Fuente: *Peters (1991)

Costo de Inversión:

Teniendo en cuenta los costos de tuberías y de las válvulas calculados, se obtiene una inversión de 130 176 \$.

Costos de mantenimiento

Debido a que el material que se propone para este sistema se caracteriza por la inexistencia de depósitos e incrustaciones, ausencia de oxidación y corrosión, según AseTUB (s/a), se considera que el mantenimiento por dichos conceptos es despreciable.

Tiempo de vida útil

A pesar de que el tiempo de vida útil planteado por la bibliografía especializada (AseTUB, s/a) es de 50 años, se consideran 10 años para el análisis.

3.5.3 Análisis de factibilidad económica

Teniendo en cuenta como base de cálculo la igualdad monetaria, la inversión inicial en cada sistema y los costos por mantenimiento durante 10 años se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 3.26. Costos involucrados en el sistema actual y en el propuesto

Parámetros	Sistema actual	Sistema propuesto
Material	Acero al carbono	PVC
Inversión inicial (\$)	414 097	130 176
Costo de mantenimiento (\$)	1 670 839*	-

* Considerando el tiempo de vida útil estimado para la instalación propuesta (10 años).

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, es más factible económicamente la inversión del sistema propuesto que invertir en reponer el sistema actual bajo las mismas condiciones de diseño. Además, el costo de mantenimiento del sistema actual, estimado para el tiempo de vida útil del sistema propuesto, supera la inversión inicial de este último, en el cual se elimina dicho costo.

Relación Beneficio-Costo

Al considerar que los beneficios (548 417 \$) se refieren a los costos por concepto de ahorro en mantenimiento (1 670 839 \$ - 130 176 \$) y los costos están relacionados con la inversión del sistema actual (130 176 \$) se obtiene una relación costo beneficio igual a 11,83 que al ser mayor que 1 corrobora la factibilidad económica de la propuesta.

CONCLUSIONES

- Se valida la hipótesis planteada, al comprobarse que el empleo del modelo de simulación permite determinar los parámetros de operación y diseño del sistema de flujo.
- A partir de la caracterización y levantamiento físico del ducto se pudo comprobar que se encuentra diseñado con tramos de diferentes diámetros de tubería, algunos de los cuales tienen que ser sustituidos por problemas de corrosión.
- Se valida el modelo de simulación empleado con un error relativo de 8,77%, mediante el cálculo de la presión de entrada al sistema de flujo actual.
- La simulación del sistema actual permitió calcular las presiones de salida de los sistemas propuestos y analizar cómo influyen las variables de operación.
- Los sistemas actual y propuestos, cumplen los requerimientos técnicos operacionales del proceso, al analizar los criterios de selección de bombas y parámetros de diseño (H, Q, NPSH). No obstante los sistemas propuestos son más idóneos por presentar menor carga y consumo de potencia de las bombas.
- Se selecciona el diámetro de la tubería de 10" y el policloruro de vinilo (PVC) como material a emplear en el diseño del sistema propuesto.
- El análisis económico arrojó un costo de mantenimiento del sistema actual de 1 670 839 \$, el cual supera la inversión de la nueva propuesta (130 176 \$) por lo que se valida la implementación de esta. La relación beneficio-costo corrobora la factibilidad económica al obtenerse un valor de 11,83.

RECOMENDACIONES

- Comunicar a los directivos de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP Centro) los resultados obtenidos para que se valore la sustitución de la infraestructura de transporte de agua residual objeto de estudio.
- Realizar un estudio más completo de factibilidad económica de la propuesta, teniendo en cuenta otros elementos de costos involucrados en el diseño.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, R. S. (2004). *Business process modelling: Review and framework*. [en línea] [Consulta: 17 enero 2015] Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527303001026>
- Alfonso Sámano, Diego. (2002). *Mecánica de fluidos*. México: Compañía Editorial Continental. 77p
- Anibal, Luis. (2008). *Bombas*. [en línea] [Consulta 9 enero 2015] Disponible en: <http://www.monografias.com/usuario/perfiles/luisanibal>
- Arora, A. (2005). *The Globalization of the Software Industry: Perspectives and Opportunities for Developed and Developing Countries. Innovation Policy and the Economy*, Volume 5. [en línea] [Consulta: 16 enero 2015] Disponible en: <http://www.nber.org/papers/w10538>
- AseTUB. (s/a). *Tuberías de PVC*. [en línea]. [Consulta: 29 mayo 2015]. Disponible en <http://scholar.google.com/>
- Bangsow, Steffen (2009). *Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk Usage and Programming with Examples and Solutions*. ISBN 978-3-642-05073-2. [en línea] [Consulta: 11 enero 2015] Disponible en: <http://link.springer.com/>
- Barjis, Joseph. (2008). *The importance of business process modeling in software*. Revisado: 30 Diciembre 2007. Aceptado: 2 enero 2008. [en línea] [Consulta: 17 enero 2015] Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/>
- Blank, Leland T. y Tarquin Anthony J. (1999). *Ingeniería Económica*. Cuarta Edición. Colombia. McGraw-Hill.
- Cabrera Galdo, Edilia y Gandón Hernández, José. (1987). *Fundamento de las Operaciones Unitarias*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Campbell, M. (2010). *The Move to the Middle: Convergence of the Open-Source and Proprietary Software Industries* [en línea] [Consulta: 11 enero 2015] Disponible en: [http://www.tandfonline.com/.](http://www.tandfonline.com/)
- Carlson, E. C. (1996). *Don't Gamble With Physical Properties For Simulations*. Chem. Eng. Progress, Vol. 92(No. 10), pp. Pg. 35-46.

- Castillo, Jorge L. (2007). Tipos de bombas. [en línea] [Consulta 9 enero 2015] Disponible en: www.monografias.com
- Castro Hernández, Daimarys, et al. (2013) *Evaluación de atmósferas peligrosas en la zona industrial de Matanzas ante posibles accidentes químicos. Monografía.* [en línea]. [Consulta: 10 enero 2015]. Disponible en <http://scholar.google.com/>
- Chung, Christopher A. (2004). *Simulation Modeling Handbook. A Practical Approach.* Washington, D.C: CRC PRESS. 493p
- Corrales, J.C. (2004) *Plantas de Producción de petróleo.* [en línea] [Consulta: 16 enero 2015] Disponible en: <http://www.energia.com>
- Crane, (s/a). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: McGraw-Hill. 178p
- Darby, R. (2001). *Chemical Engineering Fluid Mechanics. Second Edition* ed. New York: Marcel Dekker, Inc.
- De Sousa, Cristina et al. (2010). Corrosión e incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potable: Revisión de las estrategias de control. Boletín de Malariología y Salud Ambiental. Vol. L N°2. [Consulta: 29 mayo 2015]. Disponible en <http://scholar.google.com/>
- Domínguez, Jorge A, et al. (1987). *Introducción a la corrosión y protección de metales.* La Habana: Ediciones ENPES.
- EPEP Centro (2015 a). Informe de Ensayos. Control de aguas residuales. Muestreo mensual.
- EPEP Centro (2015 b). Informe económico general.
- EPEP Centro. (2015 c). Informe del Sistema de Residuales. Planta de Tratamiento de residuales.
- EPEP Centro. (2015 d). Informe de tiempo y disponibilidad de equipos. Área de tratamiento. Planta de procesamiento de Crudo.
- EPEP Centro, (2013). Manual de Documentos de la planta de Procesamiento de Crudo. Reglamento Tecnológico de la Planta de Procesamiento de Crudo.

- EPEP Centro, (2014). Manual de Documentos de la planta de Procesamiento de Crudo. Reglamento Tecnológico del Sistema de Residuales.
- Feliu, J. A., (2006). Importancia de la termodinámica en la simulación de procesos. *Revista Ingeniería Química*. No.438.111-117p.
- García, J., (2003). Determinación del diámetro en sistemas de tuberías utilizando el Mathcad. [en línea]. [Consulta: 10 enero 2015]. Disponible en <http://scholar.google.com/>
- Geankoplis, C. J., (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3ra Edición. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- González, Vicente. (2004). Ingeniería de Procesos. Apuntes para un Libro de Texto. Universidad Central de Las Villas.
- Gotera Valbuena; Eddin Rafael. (2008). Una guía para el diseño de tuberías. [en línea]. [Consulta: 15 enero 2015]. Disponible en: <http://monografias.com>
- Greene, R. W., (s/a). Válvulas. Selección, uso y mantenimiento. New York: McGraw - Hill. 215p
- Gynnild, V., D. Myrhaug y B. Pettersen. (2007). *Introducing Innovative Approaches to Learning in Fluid Mechanics: a Case Study*. *European Journal of Engineering Education*: [en línea] [Consulta: 10 enero 2015]. Disponible en <http://www.cepmagazine.org>
- Hernández de Alba, N; et al. (2003). Algunas herramientas útiles para el arquitecto del siglo XXI. Matanzas. Grupo de Marketing Urbano. Departamento de Economía Universidad de Matanzas. Cuba
- Hung, T.C., Wang, S.K. y Tai, S.W. (2005). *An Innovative Improvement of Engineering Learning System Using Computational Fluid Dynamics Concept, Computer Applications in Engineering Education*. Washington, D.C. CRC PRESS
- ITT/Goulds (2014). Chemical Process Pump (3196 Mti): Patented i – frame. Disponible en: <http://scholar.google.com/>
- Jiménez Gutiérrez, Arturo. (2003). Diseño en Procesos de Ingeniería Química III. Barcelona: Reverté.

- King, R. P., (2002). *Introduction to Practical Fluid Flow*. Oxford: Butterworth - Heinemann. 198 p
- Kleijnen, Jack P.C. (2009). *Kriging metamodeling in simulation: A review*. *European Journal of Operational Research*. 707–716p [en línea] [Consulta: 17 enero 2015] Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/>
- Kundu, P. K., (2002). *Fluid Mechanics*. Second Edition ed. New York: Elsevier Science.
- László, Zsolt. (2014). *Treatment of oily wastewater by combining ozonation and microfiltration*. [en línea] [Consulta: 11 enero 2015] Disponible en: <http://www.tandfonline.com>
- Levenspiel, O., (1993). *Flujo de Fluidos e Intercambio de Calor*. México: Reverté S.A.
- McCabe, W. L. et al.(1991). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. Cuarta edición. España: MacGraw-Hill.
- Milanés García, Yudel. (2007) *Folleto de mecánica de los fluidos e hidráulica*. [en línea] [Consulta: 10 enero 2015]. Disponible en: <http://Monografias.com>
- Ministerio de la Protección Social. (2010). Resolución número 00001618. Disposiciones generales. Características físicas, químicas, microbiológicas del agua en estanques de piscina y estructuras similares. Frecuencias de control y vigilancia de la calidad. [en línea]. [Consulta: 29 mayo 2015]. Disponible en <http://scholar.google.com/>
- Morín Figueredo, Roberto Dainier. (2008). *Evaluación del Sistema de Tratamiento de Petróleo Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro*. Tesis presentada como requisito parcial para optar por el Título de Especialista en Perforación de Pozos de Petróleo y Producción de Petróleo. 55 p
- Norma Cubana NC27:2012. *Vertimiento de Aguas Residuales a las Aguas Terrestres y al Alcantarillado – Especificaciones*.
- Peters, Max S. y Timmerhaus, Klaus D. (1991). *Plant Desing and Economics por Chemical Engineers*. Fourth Edition. Singapore: McGraw-Hill

- Pérez, S., (2004). Desarrollo de un Programa de Simulación de Procesos para el Tratamiento de Emisiones Atmosféricas. [en línea] [Consulta: 18 enero 2015]. Disponible en: <http://www.scielo.org/>
- Raiger lustman, Laura J. y López, Nancy I. (2009). Los biosurfactantes y la industria petrolera. *Revista Química Viva*. Número 3. ISSN 1666-7948. Buenos Aires, Argentina. [en línea] [Consulta: 16 enero 2015] Disponible en: <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar>
- Rosabal, J. (2006). Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. Ministerio de Educación Superior tomo II. La Habana: ENPES.
- Schlumberger. (2010). PIPESIM * production system analysis software Version 2010.1. User Guide. Houston
- Srivastava, S. (2010). *Process Modeling y Simulation*. [en línea] [Consulta: 10 enero 2015]. Disponible en: <http://www.wipro.com/documents/resource-center/library/process-modeling-simulation.pdf?Mobile=1>
- Trouvay y Cauvin. (1983). *Materiel Petrole. Petroleum Material*. Francia
- Turmero Astros, Iván José. (2013). Diseño del acueducto mayor del área Boyacá de la faja petrolífera del Orinoco. [en línea] [Consulta: 16 marzo 2015]. Disponible en: <http://Monografias.com>
- Vacca, Víctor. *et al.* (2008). Tratamiento anaerobio para la remoción de compuestos fenólicos e hidrocarburos saturados. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*. V.31 No.3 Maracaibo. Versión impresa. ISSN 0254-0770 [en línea] [Consulta: 15 enero 2015].
- Weston and Bryan. 2001. Fundamentos de Administración Financiera. México. Ediciones Mc Graw-Hill. X Ed. Tomo I y II. Disponible en: <http://www.scielo.org.ve/>
- Zainalet, *et al.* (2009). *Review of technologies for oil and gas produced water treatment*. [en línea][Consulta: 18 enero 2015]. Disponible en: <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-hazardous-materials>.
- Zamora, Blas. (2009). Enseñanza de Temas Avanzados de Mecánica de Fluidos usando Dinámica de Fluidos Computacional. [en línea]. [Consulta: 17 enero 2015]. Disponible en <http://www.scielo.org/>

ANEXOS

Anexo 1

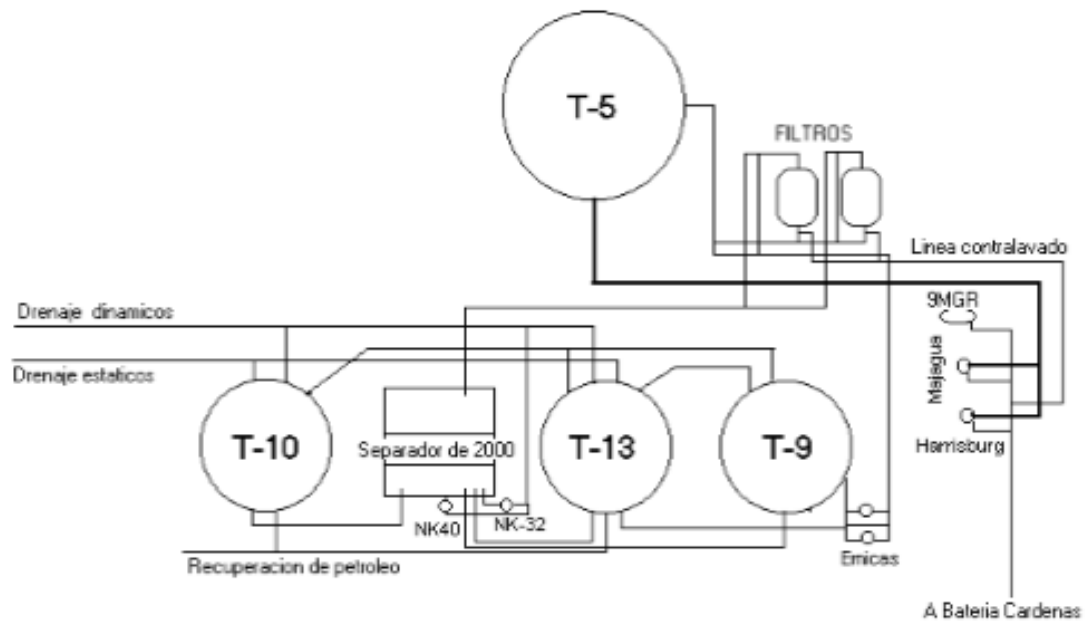


Figura A.1. Diagrama de flujo del sistema de residuales de Batería Central.

Fuente: EPEP Centro (2014).

Anexo 2

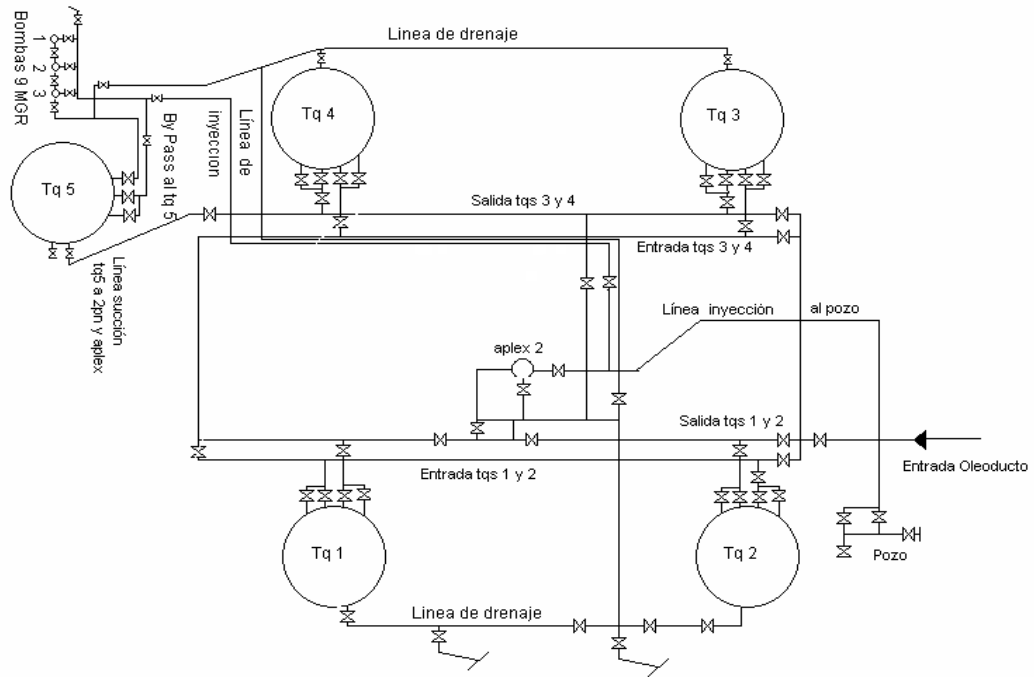


Figura A.2. Diagrama de flujo del sistema de inyección de la Batería de Cárdenas.

Fuente: EPEP Centro (2014)

Anexo 3

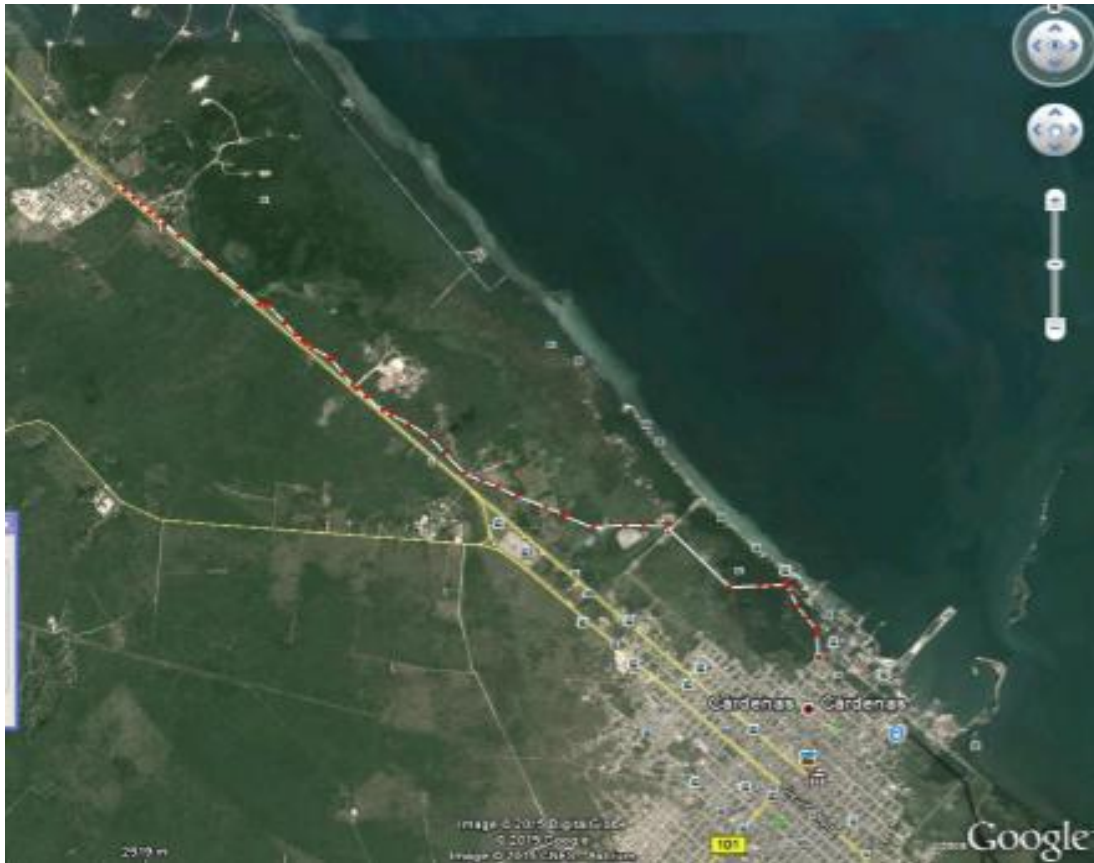


Figura A.3. Vista satelital de la infraestructura de transporte de agua residual de la EPEP Centro.

Fuente: Programa *Google earth*

Anexo 4

DEFAULT - Propiedades "Black Oil"

Propiedades "Black Oil" | Datos de Viscosidad | Calibración Avanzada de Datos (Opcional) | Contaminantes (Opcional)

Importar...
Exportar

Nombre del Fluido: Agua
Comentario Opcional:

Propiedades a Condiciones Estándar

WCut	100	%
GLR	0	sm3/sm3
S.G. Gas	0.64	
S.G. Agua	1.02	
API	30	

Calibración de datos en el Pb (Opcional pero Recomendado)

Presión		bara
Temperatura		C
Rsb		sm3/sm3

Correlación de Gas en Solución

Rs y Pb	Lasater
---------	---------

Aceptar Cancelar Ayuda

Figura A.3. Propiedades y características del fluido

Fuente: *Software Pipesim*

Anexo 5

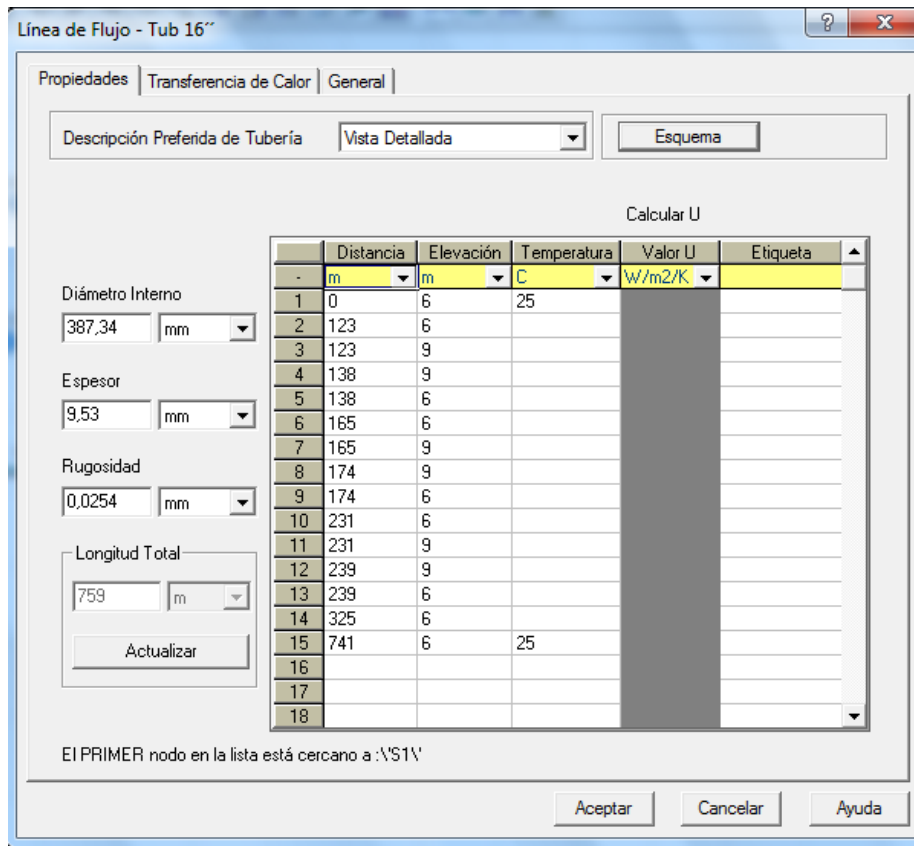


Figura A.5. Perfil topográfico de un tramo de tubería

Fuente: Software Pipesim

Anexo 6

Línea de Flujo - Tub 10"

Propiedades | Transferencia de Calor | General

Modo
 Incluir valor de U Calcular el valor de U

Recubrimiento de Tubería (empezando desde la superficie)

	K	Espesor	Descripción
-	W/m/K	mm	(Optional)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			

Conductividad de la Tubería: 50 W/m/K

Fluido Ambiental
 Aire Agua
 Velocidad: 0,03048 m/s

Datos de Enterramiento de Línea
 Profundidad de Enterramiento: mm
 Terreno Conductividad: 2,5949999 W/m/K
 Elevado sobre el terreno

Diámetro Externo Total de la Tubería: 273,1 mm

Aceptar Cancelar Ayuda

Figura A.6. Tab de transferencia de calor

Fuente: Software Pipesim

Anexo 7

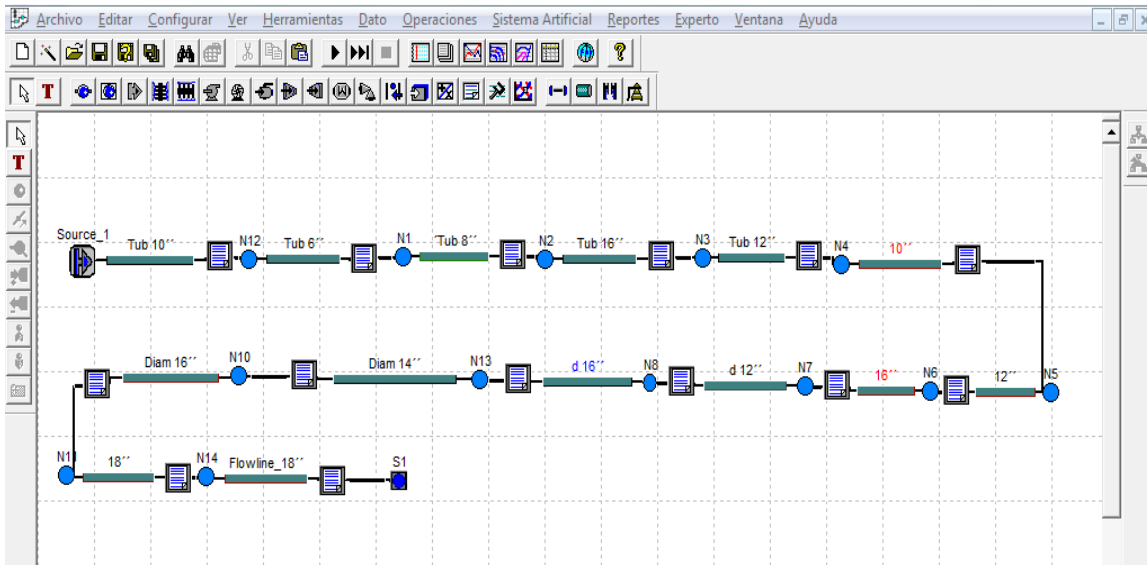


Figura A.7. Modelo de simulación

Fuente: *Software Pipesim*

Anexo 8

Curvas de Funcionamiento - 60 Hz, 3500 RPM

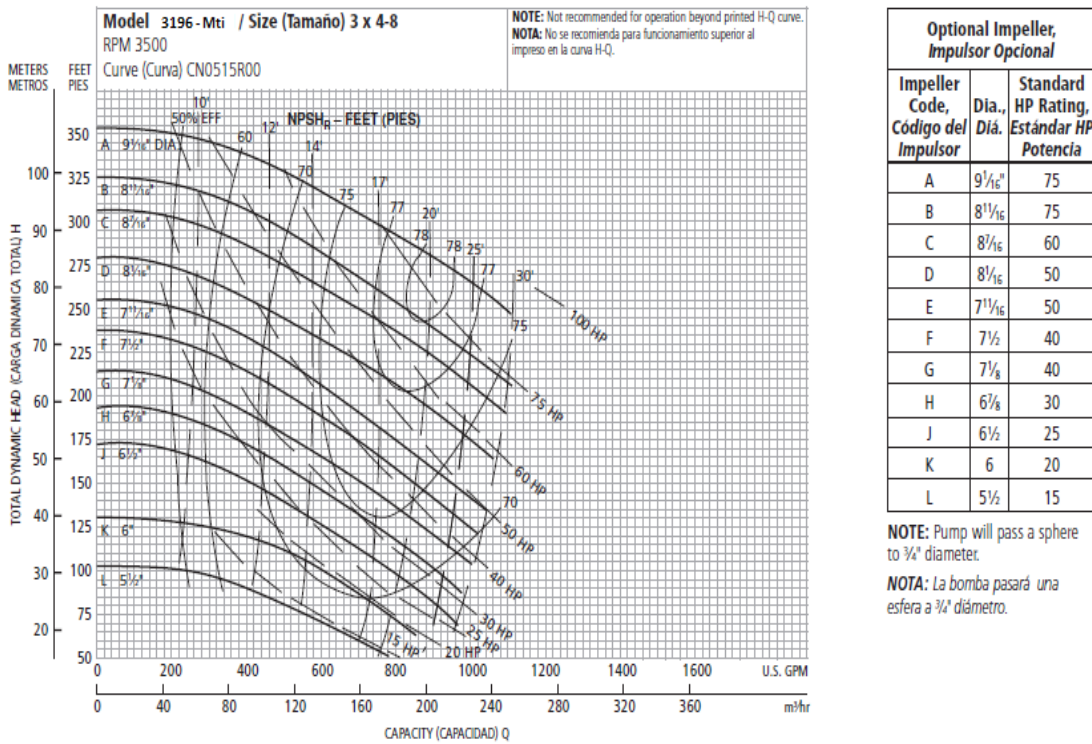


Figura A.8. Curvas características de las bombas *Goulds*

Fuente: ITT/*Goulds* (2014)