

**Universidad de Matanzas  
Facultad de Ciencias Técnicas  
Departamento de Química**



**Diseño del nuevo acueducto de agua residual de la planta de  
procesamiento de crudos de EPEP Centro**

**TRABAJO DE DIPLOMA**

Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico.

**Autor:** Yanna Díaz Avila

**Tutores:** Ing. Yoney López Hervis, Dr.C

**Matanzas, Cuba.**

**2022**

Declaración de autoridad

Yo, Yanna Díaz Avila 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

## **PENSAMIENTO**

*“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”.*

*Albert Einstein*

## DEDICATORIA

*A las personas que más amo en la vida, mis padres.*

*A mi familia y amigos en general por su apoyo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres Yanelys y Vidal por su amor y sacrificio.*

*A mis tías Liz, Bárbara y mi prima Malena por su ayuda incondicional.*

*A mi familia por estar presentes en cada momento de mi vida y brindarme todo su apoyo siempre.*

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

*A mi tutor Yoney por todo su apoyo.*

*A mis compañeros de clases María Alejandra, Rosmary y Arian por todas esas horas de estudios y risas.*

*Muchas Gracias!!!*

## **RESUMEN**

El presente trabajo se realiza en el acueducto de trasiego de aguas residuales perteneciente a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP Centro), con el objetivo de seleccionar una variante de instalación del acueducto de agua residual de la planta de procesamiento de crudos mediante la simulación de casos de estudio. 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 se utiliza polietileno de alta densidad (HDPE), lo cual permite definir los parámetros técnicos-operacionales con el uso de las dos variantes de estudio: bombeo de todo el fluido al Punto de Inyección de Aguas Residuales de Cárdenas o al Pozo Cuchillo 2 en Birama (1) o bombeo a los dos puntos de inyección simultáneamente (2). 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 el Aspen Hysys v10. En el diseño se propone homogenizar el sistema de tuberías con un diámetro de 10", con un costo de adquisición es de 973 463,4 € y se evalúa la bomba instalada donde se evidencia que la carga de la bomba es mayor que la del sistema (56,42 m) y el NPSH disponible es mayor que el requerido (14,7).

## **ABSTRACT**

The present work is carried out in the wastewater transfer aqueduct belonging to the Central Oil Drilling and Extraction Company (EPEP Centro), with the objective of selecting a variant of the installation of the wastewater aqueduct of the oil processing plant. raw by simulating case studies. For this, a bibliographical analysis is carried out, which constitutes the theoretical basis of this project. To evaluate the flow system under study, high-density polyethylene (HDPE) is used, which allows defining the technical-operational parameters with the use of the two study variants: pumping all the fluid to the Wastewater Injection Point from Cárdenas or to the WellKnife 2 in Birama (1) or pumping to the two injection points simultaneously (2). In order to establish the appropriate design parameters that guarantee the technological requirements of the process, the modeling and simulation of the hydraulic network is carried out using Aspen Hysys v10. In the design, it is proposed to homogenize the pipe system with a diameter of 10", with an acquisition cost of €973,463.4 and the installed pump is evaluated where it is evident that the pump load is greater than that of the system. (56,42 m) and the available NPSH is greater than that required (14,7).

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1: Análisis bibliográfico .....	1
1.1 Características y propiedades físico-químicas del agua residual del tratamiento de crudo.....	1
1.2 Principios del transporte de fluidos. Modelos de correlaciones.....	1
1.2.1 Conservación de la masa .....	3
1.2.2 Conservación de la energía.....	3
1.2.3 Conservación de cantidad de movimiento .....	5
1.2.4 Modelo de correlaciones para flujo .....	5
1.3 Parámetros de operación y diseño en un sistema de tuberías.....	11
1.3.1 Presión de diseño.....	13
1.3.2 Temperatura de diseño.....	13
1.4 Materiales más usados en redes hidráulicas.....	14
1.5 Simulación en sistemas de Ingeniería Química.....	17
1.5.1 Simuladores para el diseño de redes hidráulicas .....	18
1.5.2 Conclusiones parciales.....	20
2 CAPÍTULO 2: Materiales y métodos .....	21
2.1 Descripción tecnológica del proceso .....	21
2.1.1 Descripción del caso estudio .....	24
2.2 Caracterización del agua residual del tratamiento de crudo.....	26
2.3 Metodología empleada para la simulación de la red hidráulica del agua residual del tratamiento de crudo.....	27
2.3.1 Correlaciones de flujo.....	30

2.3.2	Perfil topográfico del acueducto de agua residual de la planta de procesamiento de crudos.....	30
2.4	Normas cubanas de diseño de sistemas de tuberías de polietileno para el suministro de agua.....	31
2.5	Evaluación económica .....	33
3	CAPÍTULO 3. Análisis de resultados.....	34
3.1	Parámetros y características de la infraestructura de transporte del agua residual de la EPEP Centro .....	34
3.1.1	Características físicas del ducto actual.....	34
3.1.2	Parámetros operacionales .....	36
3.2	Simulación del sistema de flujo y validación del modelo .....	37
3.2.1	Perfil topográfico del ducto .....	37
3.3	Evaluación del sistema de flujo .....	43
3.4	Diámetro de tubería adecuado .....	46
	CONCLUSIONES.....	50
	RECOMENDACIONES .....	51
	BIBLIOGRAFÍA .....	52
	ANEXOS .....	56

## INTRODUCCIÓN

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 1 500 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).

Actualmente en la provincia de Matanzas existen yacimientos de petróleo relativamente grandes. Estos yacimientos son atendidos y explotados por la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro), fundada en el año 1976. Dicha empresa se encuentra enclavada en la finca "La Cachurra", del poblado de Guásimas, municipio Cárdenas; con niveles de producción anual por encima de 1 millón de toneladas de petróleo y 420 millones de metros cúbicos de gas natural.

El proceso de producción de petróleo crudo de la EPEP – Centro, consta de dos etapas: la primera abarca la extracción, recolección y separación primaria de gas en los Centros Colectores y la segunda es el tratamiento termoquímico de las emulsiones agua en petróleo, presentes en el fluido de producción. Este 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 Planta de Procesamiento de Crudo de dicha Empresa, tiene la función de garantizar el tratamiento termoquímico 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, 2019).

El agua separada en el Proceso de Tratamiento del Petróleo, el agua de las pailas, las purgas de las Calderas, el agua que se separa en los tanques de almacenamiento de la ECO y los residuales de ENERGAS, una vez tratada en La Planta de Tratamiento de Residuales de Batería Central, pasa a ser bombeada hacia el Punto de Inyección de Cárdenas (EPEP Centro, 2021).

García (2015), en su estudio diseña el sistema de flujo de la infraestructura de transporte de las aguas residuales de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP Centro), para lograrlo establece los parámetros de diseño adecuados que garantizan los requerimientos tecnológicos del proceso y lleva a cabo una modelación y simulación de la red hidráulica mediante un software simulador de flujo. Con la simulación se definen los parámetros idóneos que permitió rediseñar el sistema de flujo de la infraestructura de transporte de las aguas residuales de la EPEP Centro. En el diseño se propuso homogenizar el

sistema de tuberías con un diámetro de 10" y utilizar el policloruro de vinilo (PVC) como material de la misma. Esta propuesta nunca se llegó a realizar por la empresa. En la actualidad el acueducto PPC – Punto Inyección Cárdenas ha presentado innumerables averías, que además de interrumpir el normal proceso de inyección de agua provoca derrames de agua sulfurosa en áreas de la traza del ducto muy cerca de la Vía Rápida y otras instalaciones, provocando impacto negativo al medio ambiente.

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

**Problema:**

¿Será técnica y económicamente factible el diseño del nuevo acueducto de agua residual de la planta de procesamiento de crudos utilizando líneas de polietileno de alta densidad?

**Hipótesis:**

Si se evalúan diferentes casos de instalación del acueducto de agua residual de la planta de procesamiento de crudos se podrá seleccionar la más adecuada desde el punto de vista técnico y económico.

**Objetivo general:**

Seleccionar una variante de instalación del acueducto de agua residual de la planta de procesamiento de crudos mediante la simulación de casos de estudio.

**Objetivos específicos:**

1. Analizar el estado del arte de la temática.
2. Obtener un modelo para el acueducto de agua residual de la planta de procesamiento de crudos.
3. Simular los casos de estudios propuestos para la instalación del nuevo sistema.
4. Evaluar económicamente las variantes propuestas para la nueva instalación.

## **CAPÍTULO 1: Análisis bibliográfico**

### **1.1 Características y propiedades físico-químicas del agua residual del tratamiento de crudo.**

Las operaciones de explotación de campos petroleros generalmente incluyen el manejo en subsuelo o superficie de aguas de formación asociadas a la producción de hidrocarburos. Estas aguas, además de estar calientes, contienen, contaminantes como: hidrocarburos suspendidos o disueltos, sólidos suspendidos, sales, carbonatos, sulfatos y metales pesados, entre otros. La concentración de estos contaminantes varía considerablemente y depende del origen del agua, del tipo de yacimiento y de las operaciones de producción.

La Planta de Tratamiento de Residuales de Batería Central abarca el tratamiento del agua residual proveniente de la deshidratación del crudo, el agua de las pailas, el agua de las calderas provenientes de la regeneración de los filtros y las extracciones de fondo, residuales de la Planta de Ciclo Combinado de Turbinas de Gas de ENERGAS S.A. y condensados contaminados provenientes de los tanques de tratamiento. (EPEP Centro, 2021).

Después de efectuado el tratamiento residual el agua es trasegada a los puntos de inyección Batería de Cárdenas y Cantel, posteriormente se inicia el proceso de inyección a pozo profundo.

### **1.2 Principios del transporte de fluidos. Modelos de correlaciones**

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.

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.

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

#### 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:

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

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 (u), 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 ( $u$ ), 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:

$$(Velocidad\ de\ entrada - Velocidad\ de\ salida + Suma\ de\ las\ fuerzas\ que\ actúan\ sobre\ el\ sistema) = 0$$

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.

### 1.2.4 Modelo de correlaciones para flujo

Para realizar un análisis del diseño de los acueductos es importante conocer el comportamiento del flujo de un fluido a través de una tubería y relacionar las principales variables que lo afectan.

(Bernal y González, 2016) plantea que hay tres tipos de régimen de flujos de fluidos en tuberías:

-Flujo laminar. Este tipo de flujo ocurre a velocidades más bajas que la crítica. Este régimen se caracteriza por el deslizamiento de capas cilíndricas concéntricas una sobre otra de manera ordenada. La velocidad del fluido es máxima en el eje de la

tubería y disminuye rápidamente hasta llegar a un valor de cero en las paredes de la tubería.

-Flujo Crítico o Transicional. Este tipo de flujo ocurre cuando el caudal transportado a través de la tubería se incrementa después de estar trabajando inicialmente bajo régimen laminar, hasta que las láminas comienzan a ondularse, rompiéndose en forma brusca y difusa.

-Flujo turbulento. En el régimen turbulento hay un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal del flujo; la distribución de velocidades en el régimen turbulento es más uniforme a través del diámetro de la tubería que en régimen laminar. Las velocidades son mayores que la crítica, siendo la velocidad crítica, aquella velocidad por debajo de la cual toda turbulencia es amortiguada por la acción de la viscosidad del fluido. A pesar de que existe un movimiento turbulento a través de la mayor parte del diámetro de la tubería, siempre hay una pequeña capa de fluido en la pared de la tubería, conocida como la “capa periférica” o “subcapa laminar”, que se mueve en régimen laminar.

Durante el transporte del fluido de un punto a otro a lo largo de toda la tubería, se presentan caídas de presión permitidos y las cuales están restringidas según el proceso. Para determinar las caídas de presión en las líneas de tubería, se debe evaluar el tipo de fluido a ser transportado y las características de la tubería (Bernal y González, 2016).

Número de Reynolds (Re).

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y diámetro del tubo a través del cual fluiría el flujo, en una expresión adimensional. Para tuberías circulares, en flujo a tubería llena, se tienen la siguiente expresión:

$$Re = \frac{v * D * \rho}{\mu} \quad \text{ec.1.5}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

D: Diámetro de la tubería

$\mu$ : Viscosidad del agua

v: Velocidad

Conservación de la Energía en Estado Estable.

El teorema de Bernoulli es un desarrollo matemático basado en la ley de la conservación de la energía, y establece que la energía total de un fluido en cualquier punto particular es la suma de la altura, la caída de presión y la velocidad. Esta ecuación es empleada para calcular valores teóricos para la presión, la velocidad de flujo, pérdida de cabeza por fricción o cabeza requerida por una unidad de bombeo para las condiciones de flujo estable.

$$Z_{e1} + \frac{144P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_{e2} + \frac{144P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad \text{ec.1.6}$$

Donde:

$Z_{e1}$  y  $Z_{e2}$ : Altura

$\rho$ : Densidad

v: Velocidad del flujo

g: Gravedad

$P_1$  y  $P_2$ : Presión

$h_L$ : Pérdidas de presión

Fórmula de Darcy – Weisbach.

El flujo de fluidos en tuberías está siempre acompañado del rozamiento de partículas del fluido entre sí, lo que representa pérdida de energía disponible. La ecuación general de la pérdida de presión en las tuberías y conductos, es la siguiente:

$$h_L = \frac{f * L * V^2}{D * 2g} \quad \text{ec.1.7}$$

Donde:

$h_L$ : Pérdidas de presión

f: Coeficiente de fricción

L: Longitud

v: Velocidad

D: Diámetro

g: Gravedad

Para que la fórmula de Darcy sea válida, se deben presentar las siguientes condiciones:

- Continuidad o estado estable: La velocidad del fluido no debe cambiar, deberá permanecer constante.
- Incompresibilidad: No existe cambio de volumen debido a un cambio en la presión
- Isotérmico: El fluido mantendrá un valor de temperatura constante.
- Longitud de tubería: La longitud de la tubería será superior a 10 veces el diámetro de la tubería en la cual es transportado el fluido.
- Diámetro interno uniforme: El diámetro interno del oleoducto no cambiará

Coeficiente de Fricción.

El factor o coeficiente de fricción,  $f$ , se define como la relación entre el esfuerzo de corte en la interfase fluido-sólido y la energía cinética del fluido por unidad de volumen.

Para régimen laminar en todas las tuberías y para cualquier fluido, en donde el valor del Reynolds es inferior a 2.000 la correlación para el factor de fricción viene dada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{ec.1.8}$$

Donde:

f: Coeficiente de fricción

Re: Número de Reynolds

Para régimen turbulento ( $Re > 2000$ ) en tubería lisa el valor de fricción es calculado con la ecuación de Hazen-Williams:

$$f = \frac{13.69 * g}{c^{1.85} * v^{0.15} * D^{0.17}} \quad \text{ec.1.9}$$

Si el flujo es turbulento en una tubería es lisa, se emplea la ecuación de Blasius (1911), esta ecuación tiene validez para  $Re < 100000$ :

$$f = \frac{0.316}{Re^{\frac{1}{4}}} \quad \text{ec.1.10}$$

Prandtl y Von-Karman (1930), propone un rango de validez más amplio para la fórmula de Blasius para tubería lisa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad \text{ec.1.11}$$

Si el flujo es turbulento en una tubería rugosa, se emplea la ecuación de Nikuradse (1933):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.71 * D} \right) \quad \text{ec.1.12}$$

Colebrook-White (1939) desarrollo una fórmula que agrupa las dos expresiones anteriores y tiene validez para todo tipo de flujos y rugosidades.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3.71 * D} \right) + \left( \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right) \right] \quad \text{ec.1.13}$$

El Diagrama de Moody (1944), es la representación (en escala logarítmica) de la expresión de Colebrook-White y permite calcular el coeficiente de fricción,  $f$ , en función del número de Reynolds ( $Re$ ) y la rugosidad relativa  $\varepsilon/D$ .

Rugosidad relativa ( $\varepsilon/D$ ).

Es la relación entre la rugosidad absoluta de la pared interna de la tubería sobre el diámetro interno de la tubería.

La rugosidad absoluta es la altura promedio de las imperfecciones en la superficie de la pared de la tubería. El valor de la rugosidad varía con el material y con el tiempo de instalación de la tubería.

Gradiente Hidráulico.

El gradiente hidráulico refleja los cambios de cabeza en los diferentes puntos del oleoducto. La presión de descarga del sistema se va cayendo, debido al movimiento del fluido a través del oleoducto. Esta pérdida de presión por unidad de longitud se conoce como gradiente hidráulico. El valor del gradiente aumenta a medida que el crudo para a través de las bombas y disminuye constantemente entre estaciones. El gradiente hidráulico debe calcularse teniendo en cuenta el perfil topográfico del terreno y la línea calculada para el gradiente.

Válvulas

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 (Greene, 1995).

(Rennels y Hudson, 2012), expone la siguiente clasificación para los diferentes tipos de válvulas:

- Válvulas multivuelatas

Los elementos de cierre de algunos tipos de válvulas se denominan tradicionalmente compuertas, discos, cuñas, émbolos. Por lo general, se necesita un movimiento lineal igual al diámetro de la tubería para abrir y cerrar completamente estas válvulas.

- Válvulas de cuarto – vuelta

Un cuarto de vuelta abre o cierra estas válvulas. El elemento de cierre tiene forma de esfera, cilindro o tapón cónico que se puede girar para dirigir el flujo. En algunas aplicaciones, la válvula se instala de modo que el fluido entre y fluya a través de la válvula desde la parte superior del disco.

- Válvulas autoactivadas

Estas válvulas pueden accionarse automáticamente por cambios en la presión, la temperatura o el flujo.

- Válvulas de control

La válvula de control regula el flujo o la presión de un medio abriéndose o cerrándose total o parcialmente en respuesta a las señales recibidas de dispositivos de detección independientes en un proceso continuo. La apertura o cierre de las

válvulas de control se realiza mediante mecanismos de control accionados eléctrica, neumática, electrohidráulica, etc. Se utilizan para controlar condiciones como el flujo, la presión, la temperatura y el nivel de líquido.

### **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 (2017), 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 (Gotera, 2017).

### **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 (Gotera, 2017).

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 (Gotera, 2017):

- 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.

Según (Rennels y Hudson, 2012), la determinación de las pérdidas de energía causadas por la división y combinación de flujo en las uniones de tuberías es de gran importancia en el diseño y análisis de sistemas de tuberías. La pérdida de energía en las uniones no solo depende de las propiedades geométricas (ángulo de la rama con respecto al tramo, relación de diámetro de rama a tramo y curvatura del borde de unión), sino también de la dirección y la proporción del flujo.

Existen diversas configuraciones de flujo a través de una tee, (Rennels y Hudson, 2012) plantean seis clases de flujo que difieren fundamentalmente entre sí. En todos los casos, el flujo en el canal común se denota por el subíndice 1, y los flujos que entran o salen del canal común se denotan por los subíndices 2 y 3. Por lo tanto, la relación de velocidad de flujo de las diversas configuraciones siempre toma la forma de:

$$w_1 = w_2 + w_3 \quad \text{ec.1.14}$$

Las ecuaciones del coeficiente de pérdida se desarrollan primero en términos de velocidad en el canal común, en cuya forma se comparan con los resultados experimentales y las fórmulas publicadas. Luego, las ecuaciones se reordenan en términos de la velocidad en las trayectorias de flujo que entran o salen del canal común. Finalmente, son presentados en una ecuación de caída de presión (o energía), en cuyo formato pueden emplearse fácilmente en un cálculo de ingeniería. El coeficiente de pérdida de ciertas rutas de flujo puede tener un valor negativo en ciertas condiciones de flujo, lo que significa que se ha producido un aumento de energía en esa ruta de flujo. La pérdida de energía en la otra ruta de flujo compensa con creces el aumento, de modo que el resultado neto es una pérdida de energía (Rennels y Hudson, 2012).

#### Tees divergentes

Las pérdidas locales de los tees divergentes consisten principalmente en pérdidas por expansión más o menos repentinas en el canal principal y pérdidas debidas al flujo que entra o sale del ramal.

#### Tees convergentes

Las pérdidas de presión de las corrientes convergentes consisten principalmente en pérdidas debidas a la mezcla turbulenta de las dos corrientes con diferentes velocidades y pérdidas debidas a la curvatura de la corriente en su paso desde el ramal al tramo.

### **1.4 Materiales más usados en redes hidráulicas**

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 (Gotera, 2017):

- **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 ( $k = 0,25$  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 presenta 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.

### **1.5 Simulación en sistemas de Ingeniería Química**

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).

Ventajas de la simulación de procesos químicos (Ingeniería Química, 2020).

1. Permite estudiar procesos existentes de manera rápida, completa y muy económica.
2. Si se utiliza un modelo matemático adecuado, se pueden realizar extrapolaciones de resultados más allá de las condiciones de operación, lo cual es virtualmente imposible o impráctico en una planta real.
3. Se pueden realizar comparaciones con minuciosidad y rapidez entre diferentes procesos, lo que permite realizar modificaciones al proceso o diseños extra que se requieran poner en operación. En pocas palabras, es

factible realizar una evaluación completa de planes alternos al proceso original.

4. La simulación permite controlar todos los factores que afectan al modelo matemático seleccionado, situación que no es del todo posible en condiciones reales.
5. Ofrece la posibilidad de estudiar la sensibilidad de los parámetros básicos del sistema, así como de los parámetros de costos. Por ejemplo, una variación del 10% de la presión puede tener o no un efecto importante en el funcionamiento del sistema.

### **1.5.1 Simuladores para el diseño de redes hidráulicas**

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.

Un ejemplo de lo antes expuesto se muestra en García (2015), en su estudio diseña el sistema de flujo de la infraestructura de transporte de las aguas residuales de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP Centro) y lleva a cabo una modelación y simulación de la red hidráulica mediante un software simulador de flujo. Con la simulación se definen los parámetros idóneos que permitió rediseñar el sistema de flujo de la infraestructura de transporte de las aguas residuales de la EPEP Centro.

Por otro parte, (Gómez, 2016) plantea la selección de una variante de instalación de la sección A del oleoducto Matanzas – Santa Cruz mediante la evaluación de casos de estudio a partir del simulador PIPESIM, el cual plantea del mismo:” El simulador PIPESIM facilita la utilización de simulaciones de fluidos de una o varias fases y permite caracterizarlos a través de las dimensiones y características del oleoducto, así como los parámetros de presión y temperatura que definen el proceso productivo”.

En el mercado actual, existe una gran cantidad de programas y software comercial de simulación de procesos, entre los cuales podemos destacar PRO/II, PROCESS, FLOWTRAN, PIPEPHASE, ASPEN HYSYS, CHEMCAD, ASPEN PLUS, LOTUS,

entre otros, mayormente orientados a recrear procesos en estado estacionario (Ingeniería Química, 2020)

### **Aspen Hysys**

Aspen Hysys o Hysys, como también se le conoce, es un poderoso simulador de procesos químicos y uno de los más utilizados en ingeniería química, siendo especialmente importante en la industria de los hidrocarburos, específicamente, de petróleo y gas.

Una de las principales características que hacen a Aspen Hysys destacar frente a otros simuladores, es su versatilidad, ya que no solo permite realizar simulaciones dinámicas y estados estables, sino que también permite diseñar procesos de modelado de rendimiento y optimización, siendo una verdadera joya dentro de las herramientas de simulación comerciales disponibles en el mercado.

Aspen Hysys es capaz de realizar la mayoría de los cálculos básicos en ingeniería química, en donde podemos destacar: balance de masa, balance de energía, cálculo de equilibrio líquido-vapor, estimaciones de transferencia de calor o transferencia de masa, además de realizar cálculos de cinética química, fraccionamiento y caída de presión (Ingeniería Química, 2021).

### **PipeSIM**

PipeSim ha sido diseñado para que pueda ser utilizado en un amplio rango de sistemas, ya sean actuales o un poco más antiguos. Esto se ha hecho pensando en que los alumnos pueden tener un PC con características muy variadas en sus casas, por tanto, aunque PipeSim ha sido optimizado para su funcionamiento bajo un sistema actual con Windows XP, se ha probado satisfactoriamente en un amplio rango de equipos y sistemas (el equipo más antiguo fue un Pentium II a 300 MHz, con 96 megabytes de RAM y Windows 98 instalado). Además, la instalación del simulador en el disco duro ocupa menos de 5 megas, por tanto, se han puesto todas las facilidades posibles para que PipeSim pueda ser utilizado por la mayoría de los alumnos, o de las personas en general, que quieran hacerlo. Figura 1. Ventana principal de PipeSim En cuanto a las facilidades de funcionamiento, el simulador se diseñó con una finalidad didáctica bien definida desde sus primeras etapas de desarrollo. Debido a dicho objetivo final, el entorno de PipeSim está basado en

ventanas, se ha procurado que sea muy fácil de manejar y se ha diseñado de la forma más atractiva y amigable posible, habiéndose cuidado mucho el aspecto final del mismo (botones con iconos descriptivos, gestión de ratón y de teclado cuidadas, explicaciones descriptivas de los pasos que se dan, amplio sistema de ayuda, etc.). Además, el simulador controla todas las posibles causas de error durante su ejecución, mostrando al usuario un gran número de mensajes de advertencia o error claros y detallados (Ingeniería Química, 2021).

### **PipeFlow Expert**

Pipe Flow Expert Aplicación para el diseño y análisis de redes de canales complejas en las que se deben equilibrar los flujos y presiones, para el cálculo hidráulico del sol. Diseñado para ayudar a los ingenieros analizar y resolver una amplia gama de temas en los que se deben identificar el flujo y la caída de presión a través de los canales / redes.

Tubería de flujo de Expertos le permite diseñar y calcular el complejo sistema de tuberías, para analizar las características del sistema, mientras que el flujo. Calcula flujo constante equilibrado y presión de las condiciones del sistema. Esto le permitirá llevar a cabo el análisis de los diferentes sistemas de canales proyecciones bajo diferentes condiciones de operación (Procesos Industriales, 2016)

### **1.5.2 Conclusiones parciales**

- 1 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.
- 2 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.
- 3 A partir de la modelación y simulación de los procesos industriales se pueden probar nuevas condiciones de diseño sin provocar perturbaciones en el sistema.

## **CAPÍTULO 2: Materiales y métodos**

### **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 como son el agua de capa libre que llega del campo por pailas, las purgas de las Calderas, el agua que se separa en los tanques de almacenamiento de la ECO y los residuales de 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.

El agua, proveniente de los drenajes de los tanques de Tratamiento de Crudo, entra al tanque # 1, 3 o tanque # 5, para ser bombeada hacia el Punto de Inyección de Cárdenas (ver anexo 2), (EPEP Centro, 2021).

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

- **Etapas # 1:** Separación del Petróleo y Sólidos Suspendidos.

El agua generada en el proceso de tratamiento de petróleo se drena hacia los Tanques Separadores # 1, 3 o 5. El agua entra a los tanques por un difusor en la columna central, a 3 m de altura.

Una vez que se comience a llenar el tanque, se da seguimiento a la operación desde el Cuarto de Control y se chequea por el Operador de RTC designado, el nivel del colchón de agua del tanque de tratamiento que se está drenando para evitar que pase petróleo hacia estos tanques o que baje el colchón por debajo del nivel deseado.

Para realizar la operación de recuperación de petróleo se debe identificar primero la cantidad de hidrocarburos presente en los tanques # 1, 3 o 5 a través del sistema de toma muestras. Para esto es necesario que el tanque tenga un nivel de columna superior a 6.0 m que es la altura a la que se encuentra la línea de recuperación de petróleo.

Con el nivel del tanque superior a 6.0 m se chequea la calidad del agua en todos los tomamuestras. A partir de este momento se aísla el tanque, se verifica que exista capacidad en la piscina de recepción de crudo y se abren las válvulas de recuperación de petróleo hasta tanto deje de salir por el tomamuestras y se verifica en la piscina que no esté cayendo petróleo. Se sube el nivel del tanque nuevamente por encima de 6.0 m y se drena el tomamuestras para evitar que se obstruya. Se da por terminada la operación.

El Tanque de Tratamiento # 10, cuenta con una batea para la recolección de los sólidos suspendidos y líneas para la recuperación de petróleo.

Para efectuar la recuperación de petróleo se lleva el nivel de la interface hasta que coincida con las salidas de recuperación de petróleo a la piscina recepción de crudo, se abren las válvulas de salida de la recuperación de petróleo a la piscina de recepción, se mantiene esta operación hasta que no salga más fluido por la misma. Los sedimentos que contiene el agua residual son depositados por efectos de desaceleración de la velocidad del fluido en la batea que está ubicada en la parte inferior de la columna central del tanque y son drenados hacia el separador de 2000 m<sup>3</sup>

- **Etapa # 2:** Almacenamiento.

Cuando se agote la capacidad del tanque que está recibiendo agua o cuando se decida por las condiciones del proceso, se cierra y se deja reposar por un tiempo mínimo de una hora y luego se bombea hacia el Punto de Inyección, se continúa recibiendo agua en otro tanque y así sucesivamente.

El agua que se almacena en el Tanque 10 cuando el nivel operacional lo requiera se bombea con las bombas instaladas en la sala de bombas de residuales hacia el Punto de Inyección.

- **Etapa # 3:** Trasiego.

En la estación de bombas de trasiego hacia el Punto de Inyección, existen tres bombas centrifugas GOULDS, que son las encargadas de trasegar toda el agua del proceso de tratamiento de residuales.

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 el Punto de Inyección y se bajan las bateas de los tanques sin que una operación interrumpa la otra.

Para bajar los cubetos hay instalada una bomba 9MGR que de ser necesario se puede utilizar para bombear al Punto de Inyección aunque no es aconsejable pues es una bomba de bajo caudal.

- **Etapas # 4:** Almacenamiento final e inyección a la capa.

El agua bombeada hacia el Punto de Inyección de Cárdenas se recibe en el tanque # 1 o 5. El agua en el tanque 5, se recibe en una toma ubicada a 1.30 m del fondo que entra a la columna central para rebosar a una altura de 8.50 m, para evitar remover los sedimentos que quedan depositados en el fondo y en el tanque # 1 se recibe a través de un difusor que se encuentra ubicado en la columna central a 3 m de altura. Cuando se agote la capacidad del tanque que está recibiendo agua, se cierra y se deja reposar por un tiempo de 1 hora y se continúa la inyección al pozo con otro tanque. Existe además la posibilidad de recibir e inyectar del mismo tanque siempre que se cumpla que el nivel es superior a los 7.5 m y se inyecte por la salida inferior.

Se realiza la inyección siempre que el nivel del tanque sea superior a los 7.5 m y chequeando por él toma muestra con una frecuencia de tiempo de dos horas la presencia de hidrocarburos, en caso de detectarse hidrocarburos, se detiene de inmediato la operación de inyección, y se deja reposar por el tiempo necesario y cuando no exista hidrocarburo se inyecta a la capa. Para el proceso de inyección de agua al pozo se cuenta con tres bombas de pistón con variadores de frecuencia. Existe además una bomba 9MGR que se utiliza para recuperar petróleo de los tanques 1 y 5 para una paila, para achicar la cajuela de la sala de bombas y para succionar del ducto de entrada en caso necesario, dejando claro la disponibilidad de operación normal con dos bombas, solamente para casos excepcionales trabajar

con las tres bombas, sin poner en funcionamiento durante ese intervalo de tiempo de operación con las 3 bombas, la bomba 9 MGR, por afectaciones en la disponibilidad eléctrica.

Durante el proceso de inyección de agua se realiza el muestreo con observación visual para evitar que se inyecte agua con alto contenido de hidrocarburos al pozo.

### **2.1.1 Descripción del caso estudio**

En la actualidad el acueducto PPC – Punto Inyección Cárdenas, está constituido por varios tramos de varios diámetros. Este Ducto en su momento fue construido para el trasiego de petróleo a la Batería de Cárdenas para la venta por cabotaje en el puerto de el mismo nombre. Cuando se construyó el Oleoducto magistral Varadero Matanza en el año 2000 quedó como acueducto para la disposición final del agua residual del proceso de tratamiento de crudo. Con el tiempo y por la agresividad del agua se han presentado innumerable cantidad de averías que además de interrumpir el normal proceso de inyección de agua provoca un derrame de agua sulfurosa en áreas de la traza del ducto muy cerca de la Vía Rápida y otras instalaciones por donde pasa provocando impacto negativo al medio Ambiente.

El oleoducto actual es aéreo y de diámetro variable desde 12, 16, 18 y llega con 20” a Cárdenas. Desde el Estero a la entrada de Cárdenas justo donde empieza la Calle Pinillos hasta el Punto de Inyección de Cárdenas ya fue sustituido por este tipo de tubería hace unos años atrás como parte de la inversión del alcantarillado de la Calle Pinillos.

Cuenta además con unas válvulas de corte a la altura del punto de Inyección de Birama para desviar el flujo hacia el tanque de 800 m<sup>3</sup> de capacidad que allí se encuentra.

Causas que originan la realización del proyecto.

- La necesidad cambiar el actual ducto por uno nuevo producto del estado crítico en que se encuentra el actual.
- La necesidad de transportar de forma estable y confiable del agua residual del proceso de deshidratación del crudo desde la PPC hasta su

disposición final en los puntos de inyección de Cárdenas y Cuchillo 2 (Birama).

- No se prevé en un corto o mediano plazo una instalación de Inyección o procesamiento que pueda asumir en su totalidad los volúmenes de agua residual del proceso de deshidratación del crudo en la PPC y de esta forma eliminar al menos El Punto de Inyección de Cárdenas.

## 2.2 Caracterización del agua residual del tratamiento de crudo.

Propiedades Físico / Química	Unidad	Valor
Temperatura	C	60 – 70
Color	Uniad PT/Co	80 – 100
pH	-	7.7 - 9.9
Fenoles	mg/l	70 – 80
Aceite y Grasas	mg/l	150 – 230
Hidrocarburos	mg/l	120 – 150
BOD5	mg/l	2,473
COD	mg/l	7,466
Sulfuros disueltos	mg/l	1,200 - 1,500
Sólidos en suspensión	mg/l	150 – 200
Salinidad	mg/l	20,000 - 25,000
Cloruros	mg/l	11,000 - 15,000
Sulfatos	mg/l	400 – 450
Sólidos disueltos	mg/l	-
Total de nitrógeno	mg/l	13.2
Carbón orgánico	mg/l	7.4
Nitrógeno orgánico	mg/l	9.22
Fosfatos	mg/l	2.5 - 3.0
Amoniaco	mg/l	2.11
Nitratos	mg/l	1.72
Nitritos	mg/l	2.8
Metales pesados.		
Aluminio	mg/l	0.236
Arsénico	mg/l	<0.001
Bario	mg/l	2.045
Boro	mg/l	33.49
Calcio	mg/l	69.3
Cobalto	mg/l	<0.010
Cromo	mg/l	<0.020
Hierro	mg/l	0.884
Litio	mg/l	6.06
Magnesio	mg/l	61
Manganesio	mg/l	0.049
Molibdeno	mg/l	<0.010
Mercurio	mg/l	<0.020
Niquel	mg/l	0.93
Potasio	mg/l	322
Sodio	mg/l	>4000
Selenio	mg/l	<0.040
Vanadio	mg/l	4.49
Zinc	mg/l	0.08
Cobre	mg/l	<0.010
Plomo	mg/l	<0.010

Fuente: Reglamento Tecnológico de la Planta de Procesamiento de Crudos, 2021

### 2.3 Metodología empleada para la simulación de la red hidráulica del agua residual del tratamiento de crudo.

Según (Haydary, 2019), la disipación de energía mecánica (caída de presión) en tuberías y en diferentes accesorios hidráulicos es uno de los problemas más importantes en el diseño de sistemas de tuberías. Los accesorios locales también pueden afectar significativamente la disipación de energía mecánica. Se han desarrollado varias correlaciones para calcular la caída de presión en los sistemas de tuberías. Para sistemas monofásicos, se utilizan correlaciones basadas en la ley de Darcy-Weisbach, como la ecuación de Colebrook, Chen. La presencia de múltiples fases complica significativamente los cálculos de caída de presión, ya que se deben tener en cuenta las propiedades de cada fluido presente. AspenHYSYS calcula la pérdida de presión total a través de la longitud de la tubería como suma del gradiente de presión causado por la fuerza gravitatoria, la pérdida de presión causada por el fluido componente de fricción y aceleración o cinética de la caída de presión:

$$\frac{dP}{dL} = \rho_m g \sin\theta + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{fr} + \rho_m w \frac{dw}{dL} \quad \text{ec2.1}$$

Donde:

P: Presión

L: Longitud de la tubería

$\rho_m$ : Densidad del fluido

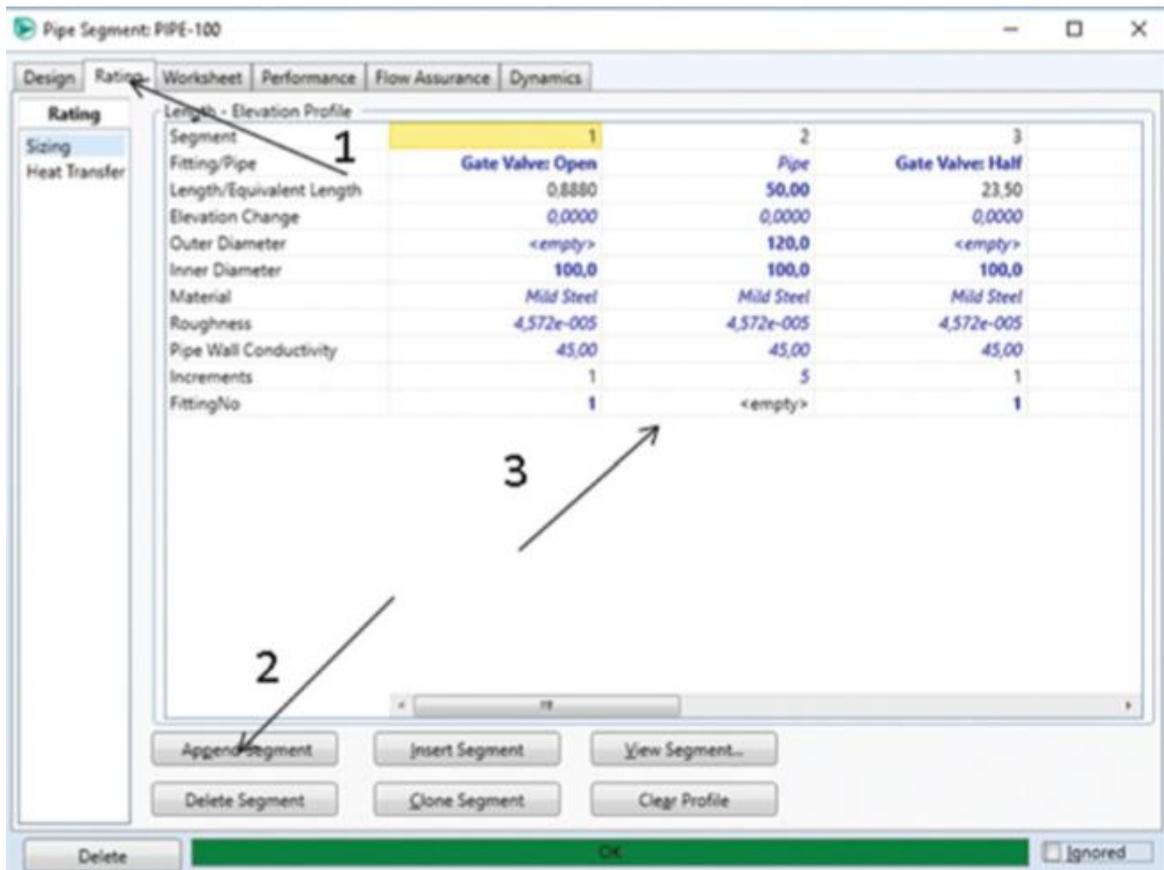
$\theta$ : Ángulo de inclinación de la tubería

fr: Fricción

w: Velocidad del líquido.

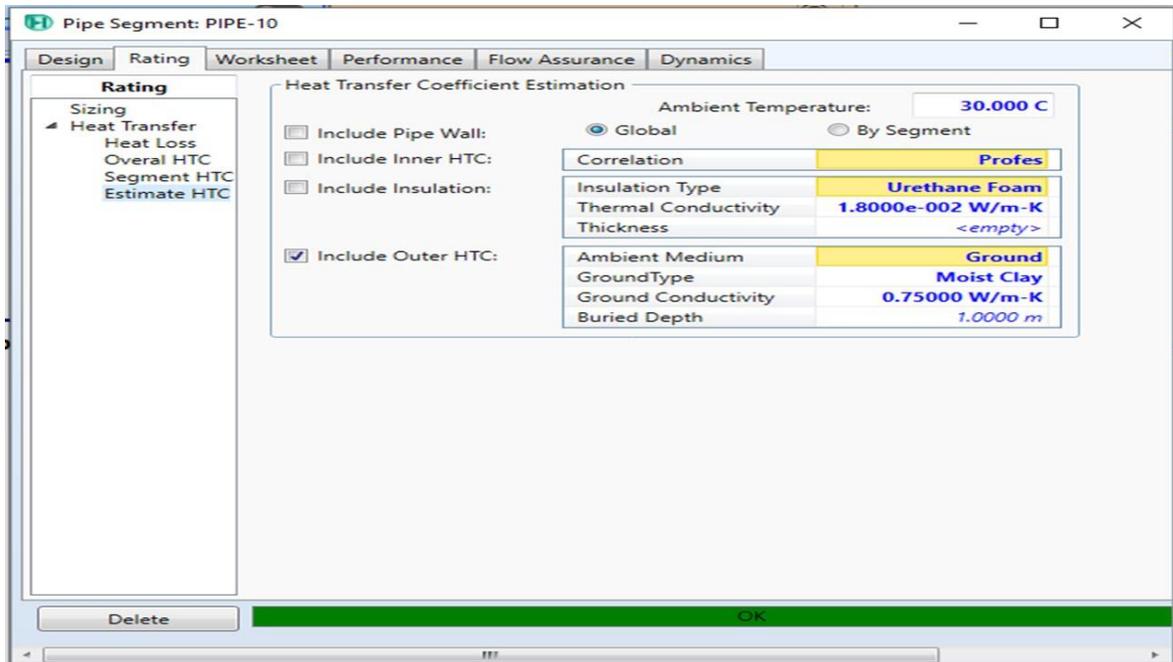
La metodología empleada para la simulación de la red hidráulica es la siguiente:

En la Figura 2.1, se muestra cómo se definen los segmentos de tubería. Para cada segmento de tubería y elemento de conexión se debe definir un segmento separado, en el mismo orden en que se colocan en el sistema de tuberías.



**Figura 2.1** Definición de segmentos de tubería

Aspen HYSYS ofrece diferentes posibilidades de especificar la transferencia de calor entre el sistema y el entorno. En la figura 2.2 se muestra como se determina el coeficiente de transferencia de calor si se conoce la temperatura ambiente y el medio alrededor de la tubería. En el caso de estudio que se presenta la tubería se encuentra enterrada a 1 m de profundidad en un terreno arcilloso.

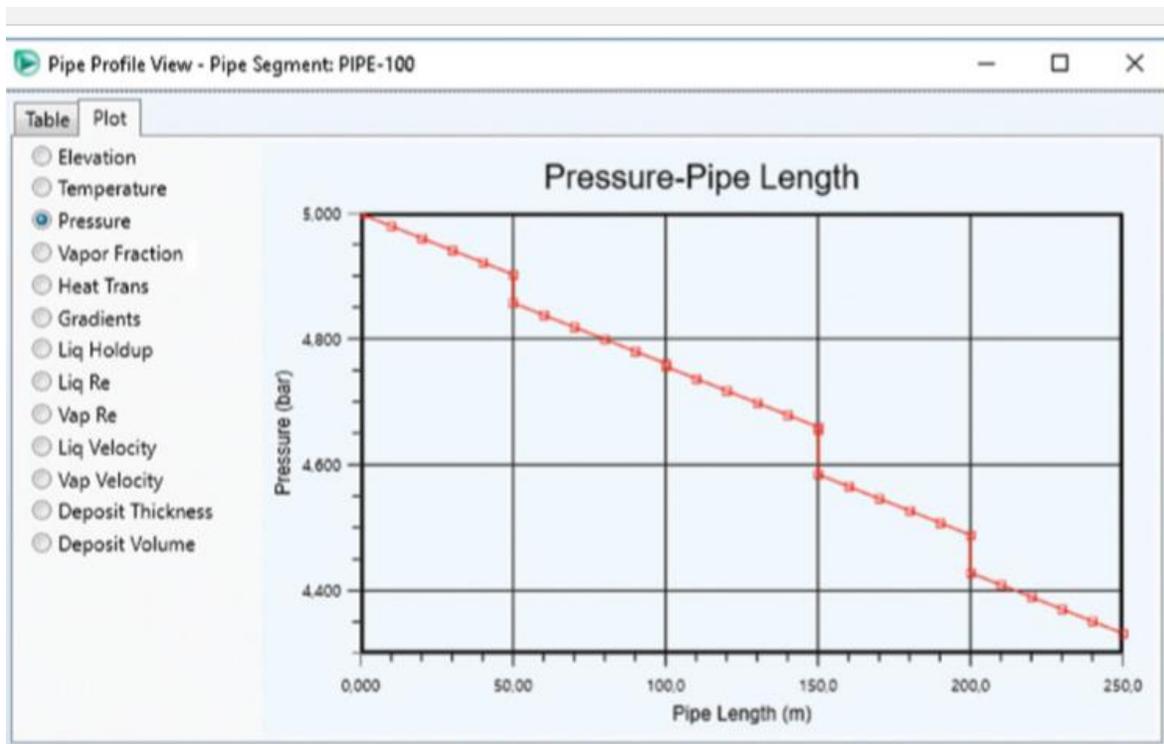


**Figura 2.2** Especificación de las condiciones de transferencia de calor desde el sistema de tuberías.

Aspen HYSYS calcula las condiciones de la corriente de salida, así como los diferentes perfiles a lo largo del sistema de tuberías. Para comprobar la presión de salida y la temperatura de salida, (Figura 2.3).

	1	2	E1
Vapor	0,0000	0,0000	<empty>
Temperature [C]	25,0000	24,8167	<empty>
Pressure [bar]	5,000	4,332	<empty>
Molar Flow [Nm3/d(gas)]	1194411,3232	1194411,3232	<empty>
Mass Flow [kg/h]	40000,0000	40000,0000	<empty>
LiqVol Flow [barrel/day]	6050,3934	6050,3934	<empty>
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,849e+005	-2,849e+005	<empty>
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	6,557	6,511	<empty>
Heat Flow [kW]	-1,75714e+05	-1,75724e+05	9,24340e+00

**Figura 2.3** Condiciones de la corriente de salida del sistema de tuberías.



**Figura 2.4** Perfil de presión a lo largo de la tubería

Para mostrar el perfil de presión u otros parámetros a lo largo de la tubería, use la pestaña **Performance-View Profile**. Los perfiles se muestran en forma de tablas y gráficos.

### 2.3.1 Correlaciones de flujo.

AspenHYSYSHelp proporciona una descripción detallada y referencias de correlaciones utilizadas para calcular la caída de presión en tuberías, incluida su aplicabilidad para diferentes geometrías de tubería (ver anexo 3).

### 2.3.2 Perfil topográfico del acueducto de agua residual de la planta de procesamiento de crudos.

Se establece una relación de las distancias con respecto a las elevaciones correspondientes, del tramo PPC a Cárdenas y PPC a Birama (ver anexos 4 y 5).

## **2.4 Normas cubanas de diseño de sistemas de tuberías de polietileno para el suministro de agua.**

En el diseño de sistemas de tuberías de polietileno se emplean diferentes normas cubanas, algunas de ellas son:

- NC 969: 2013 Tuberías presurizadas de polietileno – Especificaciones para el cálculo, diseño, transportación, manipulación, almacenamiento y colocación.

Esta Norma Cubana establece los requisitos para el cálculo, diseño, transportación, manipulación, almacenamiento y colocación de las tuberías fabricadas con resina de polietileno (PE) que se utilicen en los conductos para trasvasar fluidos a presión. En ella se precisan las características fundamentales del polietileno, materia prima más extendida para la fabricación de las tuberías y accesorios que se usan con más frecuencia en conductos a presión. Se fijan los criterios básicos y los requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en el diseño de los sistemas a presión con tuberías de PEAD, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad, funcionalidad, calidad, eficiencia y sostenibilidad durante su vida útil.

- NC-EN 12666-1: 2017 Sistemas de canalización en materiales plásticos para evacuación y saneamiento enterrado sin presión-polietileno (PE)- Parte 1: Especificaciones para tubos, accesorios y el sistema.

Esta parte de la Norma NC-EN 12666 especifica los requisitos para tubos, accesorios, y para sistemas de canalización de polietileno (PE) destinados a utilizarse para la evacuación y el saneamiento enterrado sin presión en el exterior de la estructura de edificios y la evacuación y el saneamiento enterrado sin presión instalado tanto en el interior de la estructura de edificios como en el exterior de la estructura de edificios. Esta norma es aplicable a tubos de PE con o sin embocadura integrada.

- NC ISO 4427-1: 2015 Plásticos – Sistemas de tuberías plásticas –tubos y accesorios de polietileno (PE) para el suministro de agua – Parte 1: Generalidades.

La norma establece los aspectos generales de los sistemas de tuberías de polietileno (principales y de servicio) utilizados para el suministro de agua en el

consumo humano, incluyendo además el agua previa al tratamiento y la utilizada en usos generales. También especifica los parámetros para los métodos de ensayo a los que se hace referencia en la norma. Esta norma es aplicable a tubos y accesorios de PE, sus uniones y las conexiones mecánicas con componentes de otros materiales, que sean utilizados en las siguientes condiciones:

- A una presión máxima de operación (MOP) (hasta 25 bar 1);
- A una temperatura de operación de 20°C como temperatura de referencia.
  - NC ISO 4427-2:2015 Plásticos - Sistemas de tuberías plásticas –tubos y accesorios de polietileno (PE) para el suministro de agua – Parte 2: Tubos.

Esta parte de la Norma Cubana establece los requisitos generales de los tubos hechos en polietileno (PE) utilizados para el suministro de agua en el consumo humano, incluyendo además el agua previa al tratamiento y la utilizada en uso generales.

Se especifican tres tipos de tubos:

- Tubos de polietileno (diámetro exterior  $d_n$ ), incluida cualquier banda de identificación;
- Tubos de polietileno con capas coextruídas ya sea por fuera o por dentro del tubo, o ambos casos, (diámetro exterior total  $d_n$ ), donde todas las capas tienen el mismo grado de MRS (Resistencia mínima requerida);
- Tubos de polietileno (diámetro exterior  $d_n$ ) que poseen una capa adicional contigua, termoplástica y desprendible en la parte exterior de la tubería (tubería revestida).
  - NC-ISO 4427- 3: 2017 Sistema de tuberías plásticas – Tubos y accesorios de polietileno (PE) para el suministro de agua – Parte 3: Accesorios.

Esta parte de la NC ISO 4427 establece los aspectos generales que deben cumplir los accesorios hechos de polietileno (PE) que forman parte de los sistemas de tuberías plásticas utilizados para el suministro de agua en el consumo humano, incluyendo además el agua previa al tratamiento y la utilizada en otros usos.

La norma es aplicable a los siguientes tipos de accesorios:

- Accesorios por fusión – accesorios de electrofusión, accesorios por fusión a tope y accesorios de fusión por embocadura

- Accesorios fabricados
- Accesorios mecánicos
- Accesorios embridados
  - NC-ISO 4427- 5: 2017 Plásticos – Sistemas de tuberías plásticas – tubos y accesorios de polietileno (PE) para el suministro de agua – Parte 5: Idoneidad para los objetivos del sistema.

La norma establece los requisitos de idoneidad o aptitud al uso en el montaje de sistemas de tuberías hechas de polietileno (PE) utilizados para el suministro de agua en el consumo humano, incluyendo además el agua previa al tratamiento y la utilizada en uso generales.

Esta parte de la norma NC ISO – 4427 es aplicable a los siguientes tipos de accesorios:

- Accesorios con extremos machos (de espiga)
- Accesorio de electrofusión por embocadura
- Accesorio de electrofusión por solapa o montura
- Accesorios mecánicos

## **2.5 Evaluación económica**

Para la evaluación económica se tuvo en cuenta el mantenimiento efectuado en el ducto en los años 2021 hasta octubre 2022, así como el costo de las tuberías de polietileno según el diámetro de la misma. El análisis económico se realizara de manera cualitativa por no contar con los datos necesarios para otro tipo de evaluación.

## **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**

Para iniciar la investigación fue necesario realizar la caracterización de los parámetros técnicos – operacionales del ducto que transporta el agua residual de la EPEP Centro. La descripción tecnológica del sistema de flujo fue descrita en el epígrafe 2.1.

#### **3.1.1 Características físicas del ducto actual**

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 6 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).

Desde el año 2019 en el ducto a Cárdenas se han detectado más de 30 averías por salideros de agua de capa en diferentes tramos debido al mal estado del mismo.

Además, en la actualidad se observa que fundamentalmente en los tramos cercanos a la costa, 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
<b>Total</b>	<b>10 263</b>	<b>4</b>	<b>110</b>	<b>34</b>

Fuente: EPEP Centro (2014)

### 3.1.2 Parámetros operacionales

Tabla 3.2. Parámetros técnicos – operacionales del sistema de flujo

Parámetros medidos	Valores	Unidades
Volumen de agua	500 a 2000	m <sup>3</sup>
Tiempo de Bombeo	5 a 14	h
Temperatura en tanques de B. Central	40 a 80	°C
Temperatura en tanques de B. de Cárdenas	25 a 30	°C

salida de la estación de bombas en la Batería Central  
 entrada del agua residual a la Batería de Cárdenas

Fuentes: EPEP Centro (2015 a, b)

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 (2021) 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).

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	Mti
Carga máxima	70 m
Flujo máximo	175 m <sup>3</sup> /h
Presión máxima	290 psi (100°F)
Size	3x4-7

rpm	3560
Ø impelente	7"

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 del ducto

Para introducir los datos del perfil topográfico se necesita los valores de diámetro interno y diámetro externo, rugosidad y conductividad térmica de la pared de los tubos de polietileno de alta densidad. En este trabajo se analizan dos variantes: bombear todo el flujo al punto de inyección a Cárdenas o al pozo Cuchillo 2 en Birama (variante 1) y bombear 600 m<sup>3</sup>/día al pozo Cuchillo 2 y el resto al punto de inyección de Cárdenas (variante 2).

La rugosidad del PEAD que se utiliza en este estudio es de  $1,4 \cdot 10^{-5}$  m y la conductividad de 0,17 W/mK. Los diámetros se relacionan en la tabla 3.1 según lo referido en la norma **NC ISO 4427-1: 2015** y **NC ISO 4427-2: 2015**.

**Tabla 3.1 Diámetro de las tuberías de PEAD (PE-100)**

Diámetro nominal (in)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)
8	201,8	8,6	184,6
10	252	10,7	230,6
12	317,8	13,6	290,6
14	357,8	15,1	327,6

Fuente elaboración propia.

A continuación, se muestran los cambios de elevación para el acueducto hasta el punto de inyección de Cárdenas (figura 3.1) y al pozo Cuchillo 2 de Birama (figura 3.2).



**Figura 3.1** Perfil topográfico desde la PPC hasta el punto de inyección de Cárdenas.

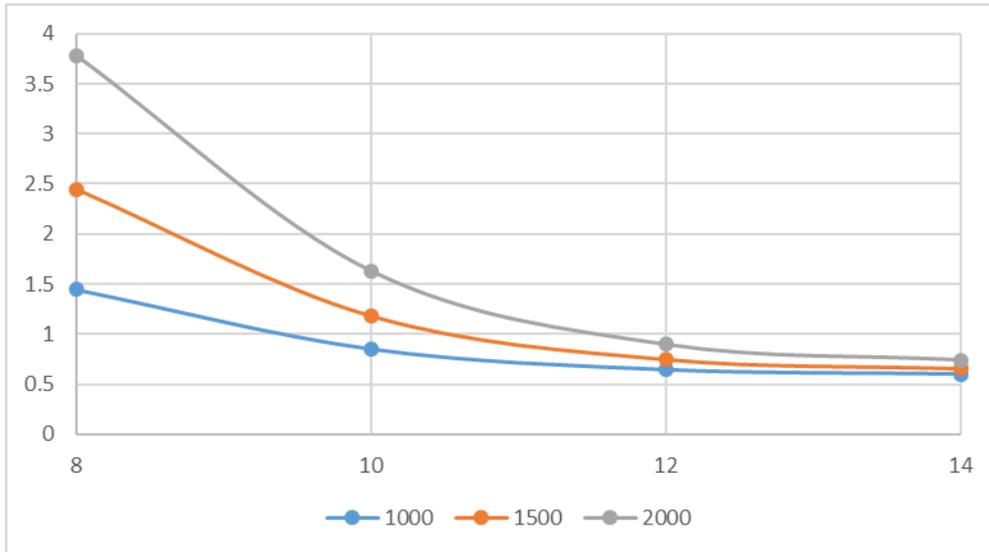


**Figura 3.2** Perfil topográfico desde la PPC hasta el pozo Cuchillo 2 de Birama.

### 3.2 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se analiza el flujo de agua para las condiciones actuales (1000 m<sup>3</sup>/día), el incremento a mediano (1500 m<sup>3</sup>/día) y largo plazo (2000 m<sup>3</sup>/día) para las dos variantes.

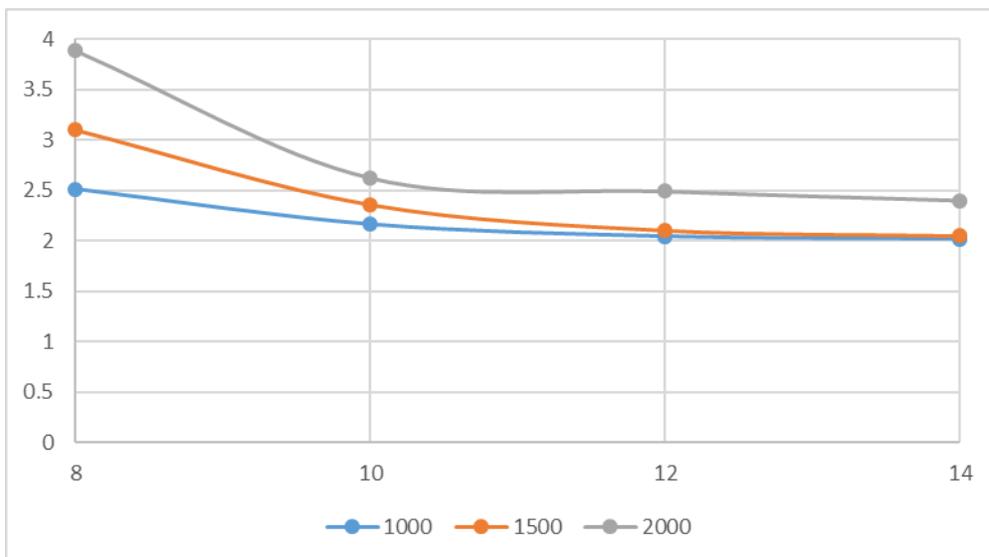
En la figura 3.3 A se muestran las caídas de presión en función del diámetro interior para cuando se bombea todo el flujo a Cárdenas.



**Figura 3.3 A** Caídas de presión en función del diámetro interior a Cárdenas.

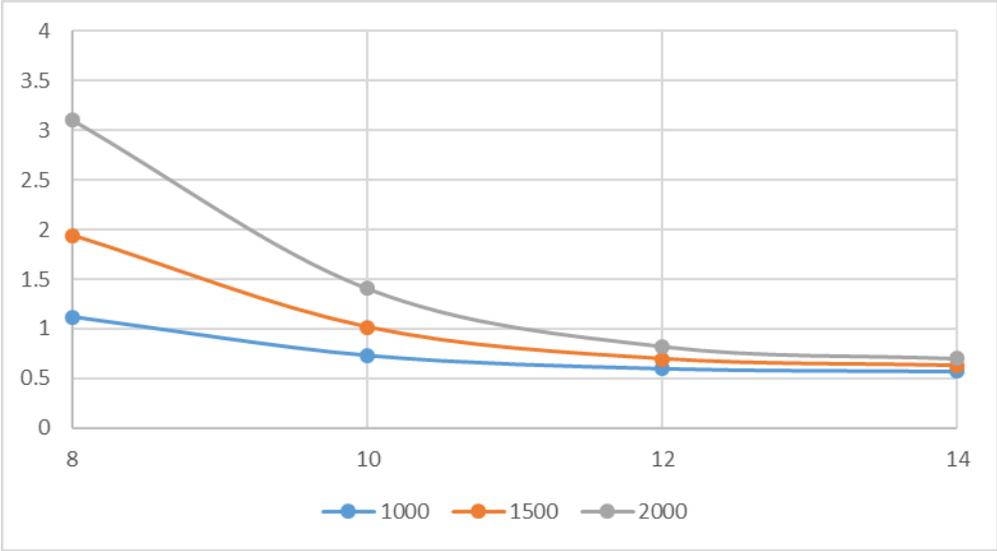
Como se puede apreciar no hay cambios significativos en la caída de presión a partir del diámetro interior de 12".

En la figura 3.3 B se muestran las caídas de presión en función del diámetro interior para cuando se bombea todo el flujo a Birama. En este caso no hay variación significativa en la caída de presión a partir de 10".

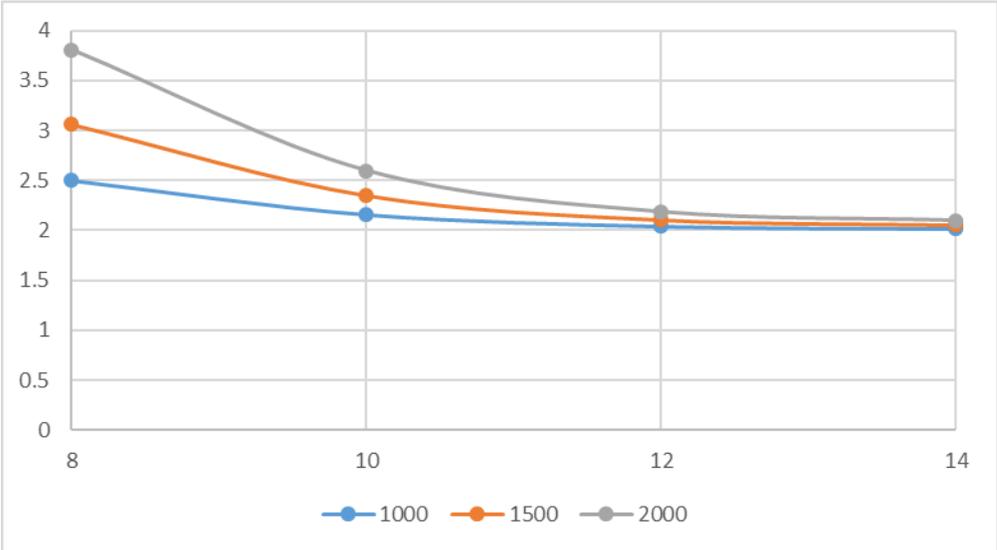


**Figura 3.3 B** Caídas de presión en función del diámetro interior a Birama.

Cuando se analiza la variante 2 se puede observar que no hay variación significativa en la caída de presión a partir de 12", según se muestra en la figura 3.4 A (bombeo a Cárdenas) y figura 3.4 B (bombeo a Birama).



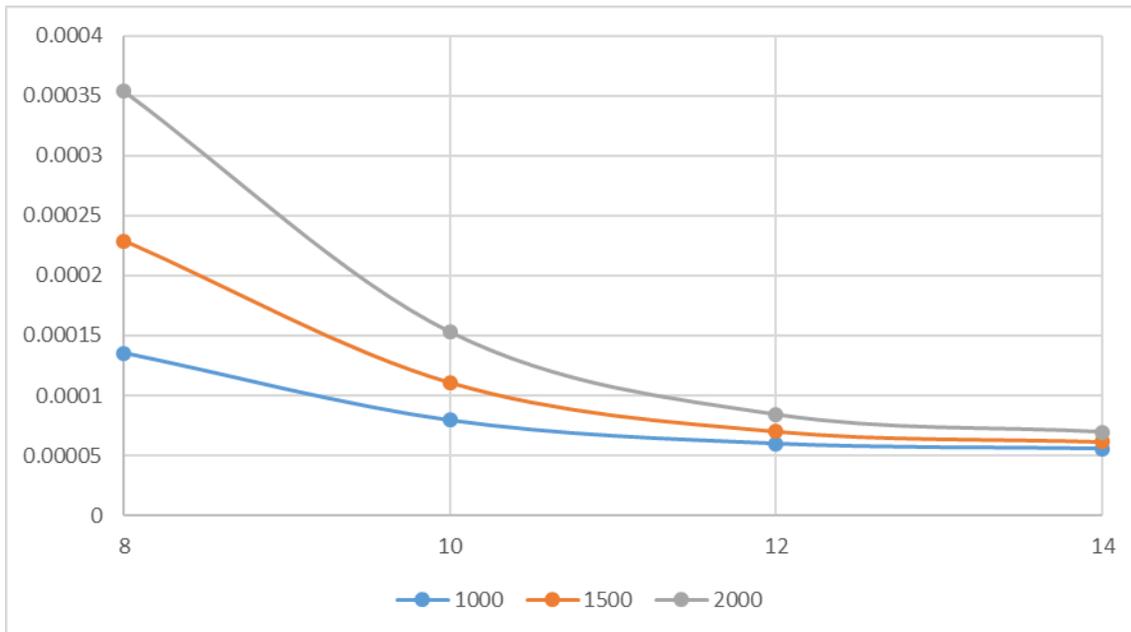
**Figura 3.4 A** Caídas de presión en función del diámetro interior a Cárdenas.



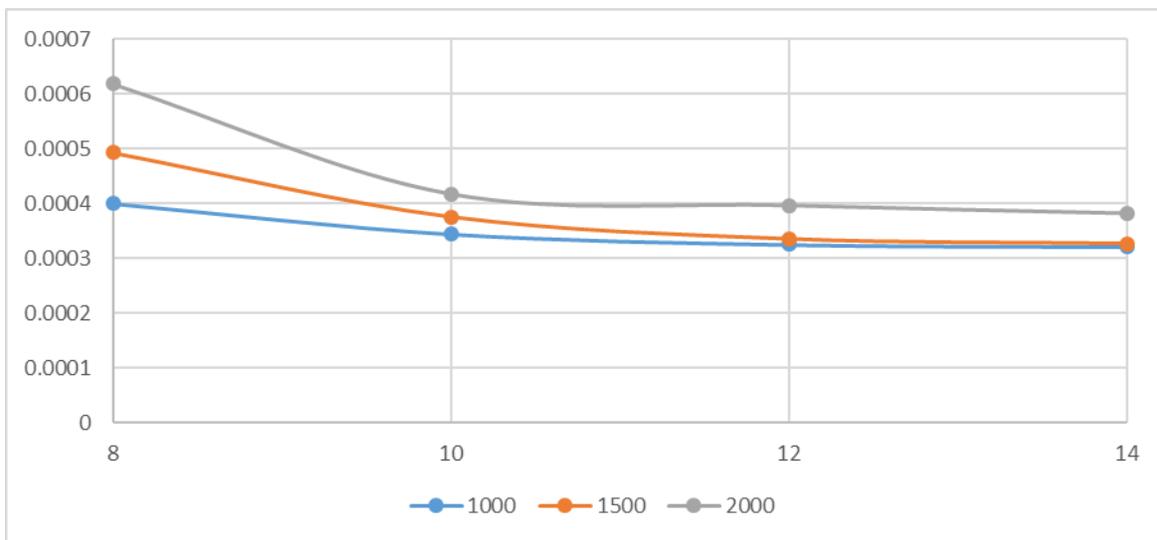
**Figura 3.4 B** Caídas de presión en función del diámetro interior a Birama.

En las figuras 3.5 A y 3.5 B se muestran las caídas de presión /m para cuando se bombea todo el flujo a Cárdenas y todo el flujo a Birama. En estos casos no hay variación significativa en la caída de presión a partir de 12".

Además, cumple con el valor según heurísticas siendo  $dp/m < 0,0045$  barg/m.

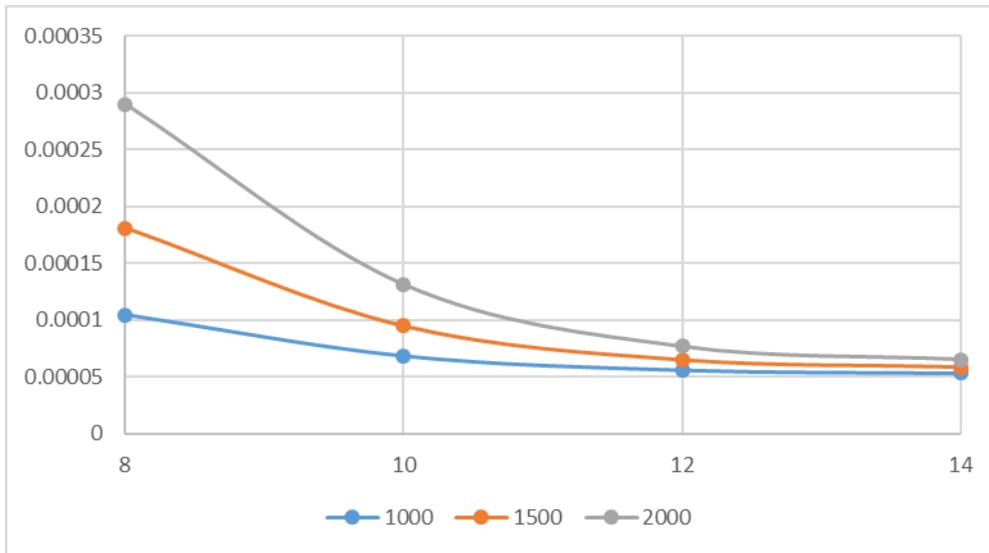


**Figura 3.5 A** Caídas de presión /m a Cárdenas.

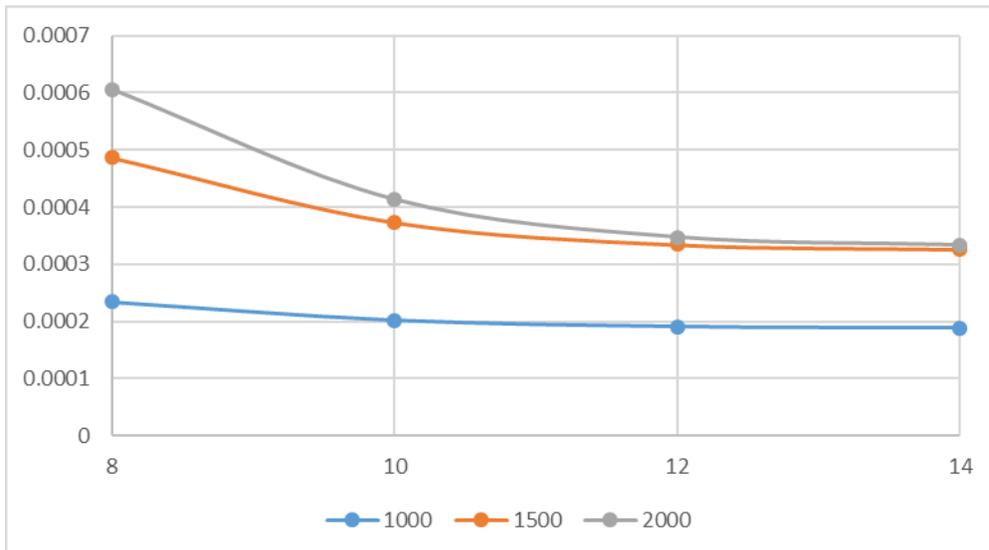


**Figura 3.5 B** Caídas de presión /m a Birama.

En las figuras 3.6 A (bombeo a Cárdenas) y 3.6 B (bombeo a Birama) se puede observar que no hay cambios significativos en la caída de presión a partir de 12" y se cumple  $dp/m < 0,0045$ .



**Figura 3.6 A** Caídas de presión /m a Cárdenas.



**Figura 3.6 B** Caídas de presión /m a Birama.

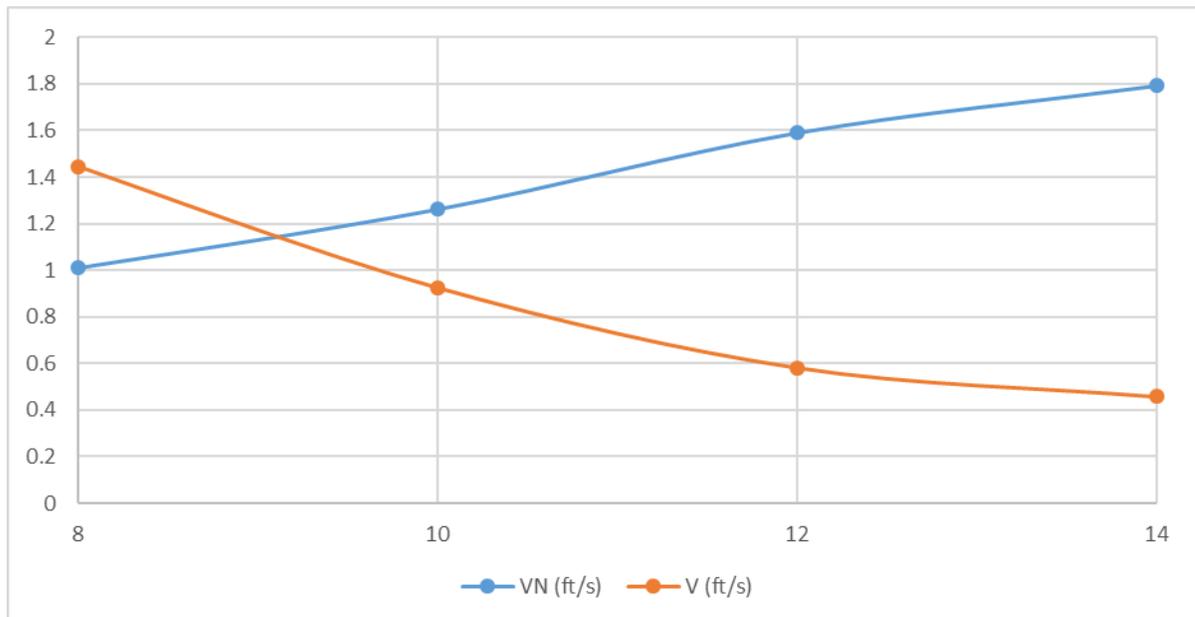
A continuación se muestra la velocidad nominal para los diferentes diámetros según heurísticas para líquidos en tuberías (tabla 3.2).

**Tabla 3.2 Velocidad nominal según heurísticas para líquidos en tuberías.**

DN	VN (ft/s)
8	1.01
10	1.26
12	1.59
14	1.79

Fuente: Elaboración propia.

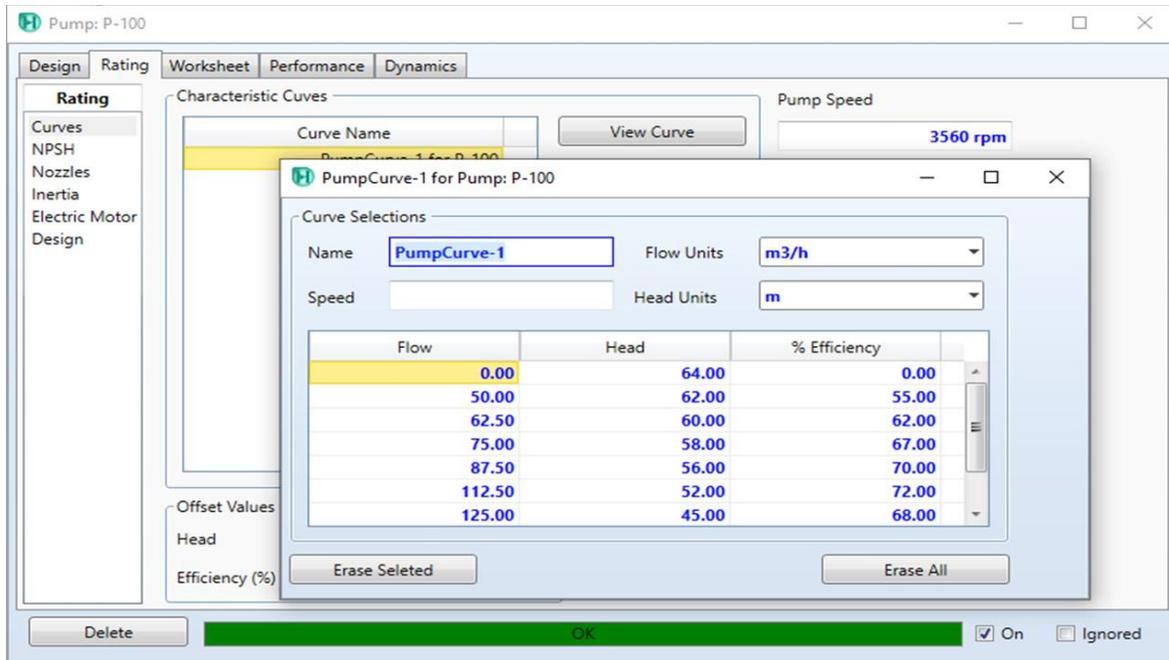
En la figura 3.7 se puede apreciar que la velocidad nominal es menor que la velocidad del fluido para un diámetro nominal de 8.



**Figura 3.7** Velocidad del fluido comparada con la velocidad nominal según heurísticas.

### 3.3 Evaluación del sistema de flujo

Para la evaluación del sistema de flujo se introducen los datos de la curva de funcionamiento de la bomba como se muestra en la figura 3.8. Para el análisis se muestran 2000 m<sup>3</sup>/día.



**Figura 3.8** Curva de funcionamiento de la bomba.

### Evaluación de bombas

Como se muestra en la figura 3.9, según los resultados de la simulación el punto de operación de la bomba se encuentra a una carga de 56,42 m y una eficiencia de 69,5 5% y un consumo de potencia de 18,38 kw.

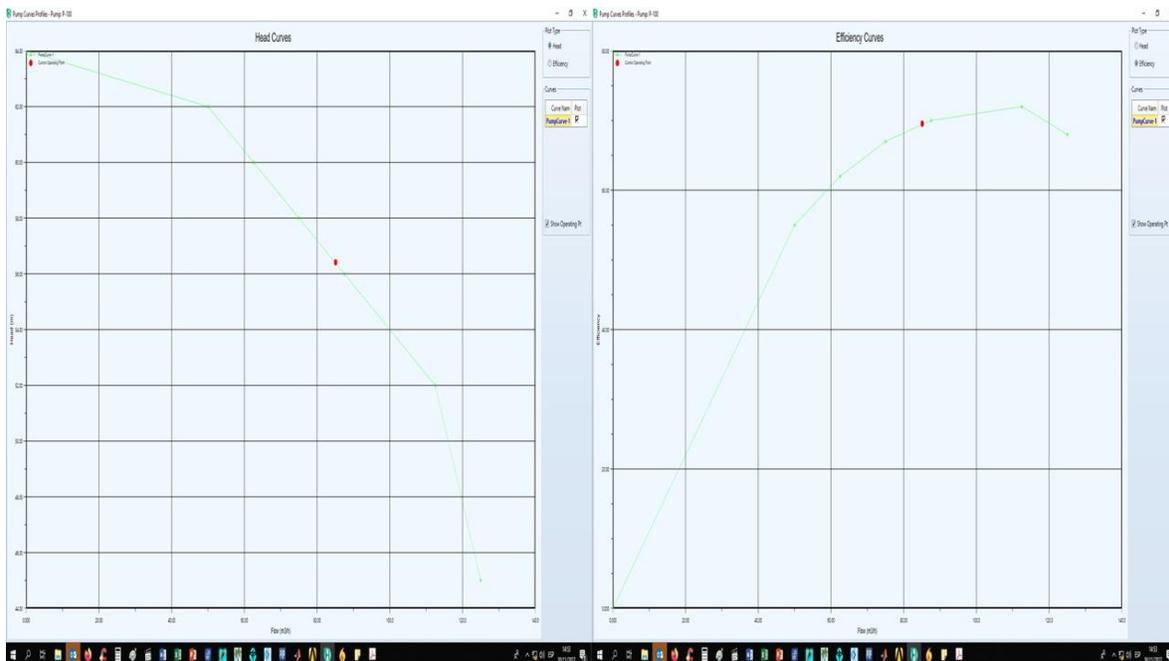


Figura 3.9 Punto de operación de la bomba.

Al comparar los parámetros de diseño de los sistemas propuestos con los de la bomba instalada (tabla 3.3 y tabla 3.4), se cumple para la variante 1 y 2 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 3.3 Evaluación de la bomba instalada para la variante 1

Parámetros	Cárdenas			Birama		
	10"	12"	14"	10"	12"	14"
Dn	10"	12"	14"	10"	12"	14"
Q(m <sup>3</sup> /h)	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33
Hs(m)	17,03	9,35	7,72	27,39	26,01	25,06
Hb(m)	56,42	56,42	56,42	56,42	56,42	56,42
NPSHs	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71
NPSHb	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.4 Evaluación de la bomba instalada para la variante 2

Parámetros	Cárdenas			Birama		
	10"	12"	14"	10"	12"	14"
Dn	10"	12"	14"	10"	12"	14"
Q(m <sup>3</sup> /h)	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33
Hs(m)	14,67	8,58	7,30	27,11	22,79	21,88
Hb(m)	56,42	56,42	56,42	56,42	56,42	56,42
NPSHs	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71	14,71
NPSHb	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2

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.

La carga neta de succión positiva (NPSH<sub>s</sub>) 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 3.5 Consumo de potencia de la bomba para los diferentes sistemas

Parámetro	10"	12"	14"
Potencia (Kw)	18,38	15,62	14,34

Fuente: Elaboración propia.

El consumo de potencia es menor a medida que aumenta el diámetro, ya que este es directamente proporcional a la carga requerida por el sistema. La carga del sistema disminuye con el aumento del diámetro al disminuir las pérdidas por fricción. En la medida que disminuye la carga del sistema, menor es la potencia que debe suministrarse para impulsar el fluido desde el punto inicial al final.

### 3.4 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

Para la estimación de los costos se consulta el catálogo 2020: Ciegoplast empresa productora de tuberías y accesorios de PEAD. Tuberías, conexiones y piezas.

Tabla 3.6 Costos de tuberías de PEAD (2020)

Díámetro nominal	Costo(€/m)	Longitud (m)	Costo total (€)
10"	57,33	16 980	973 463,4
12"	91,20	16 980	1 548 576
14"	93,45	16 980	1 586 781

Fuente: Elaboración propia.

El diámetro nominal seleccionado es de 10" por satisfacer las necesidades operacionales y tener menor costo. Además, mientras más pequeño es el diámetro más económico es la transportación y el montaje del ducto.

Tabla 3.7 Descripción de las averías en el ducto desde 2021 hasta octubre 2022

2021									
Cód OT	Clasificación OT	DESCRIPCIÓN	ESTADO	H/H	MANO OBRA	MATERIAL	Otros Costos	GASTO IND	TOTAL
066359	Averia	SALIDERO POR PRENSE VÁLVULA DE PETROLEO QUE COMUNICA OLEODUCTO VIEJO	Confirmada	6.0	28.41	0.00	0.00	100.62	129.03
066365	Averia	VALVULA DE SALIDA PARA CARDENAS CON SALIDERO POR PRENSE	Confirmada	6.0	24.10	0.00	0.00	100.62	124.72
066476	Mantenimiento Proactivo	REPARAR OLEODUCTO BATERIA A CARDENAS.	Confirmada	45.0	174.82	0.00	0.00	552.15	726.97
067132	Mantenimiento Preventivo	TRATAMIENTO ANTICORROSIVO DE 50 SOPORTES DE TUBERÍA DE BATERÍA CENTRAL. AREA METÁLICA: 80 M2	Confirmada	51.0	218.26	150.62	0.00	1,106.70	1,475.58
067271	Mantenimiento Proactivo	SUSTITUCION DE CODO 90 EN EL DUCTO A CARDENAS	Confirmada	63.0	255.24	30.61	0.00	773.01	1,058.86
067325	Mantenimiento Proactivo	MONTAJE DE SUNCHO DE 12 PULG X 400 EN EL DUCTO DE CARDENAS.	Confirmada	7.0	28.36	0.00	0.00	85.89	114.25
067396	Mantenimiento Proactivo	SUSTITUCION DE TRAMO DE TUBERÍA DE 16 PULG Y MONTAJE DE PASO DE CALLE EN TK-6 DE BATERIA CENTRAL	Confirmada	48.0	189.18	0.00	0.00	588.96	778.14
070216	Averia	MONTAJE DE DOS SUNCHOS UNO PROXIMO AL SOPORTE 251 Y OTRO ENTRE EL SOPORTE 240 Y 241 EN TUBERÍA DE 12" DE DIAMETRO EN EL DUCTO A CARDENAS Y ADAPTACION DE UNO DE LOS SUNCHOS (AVERIA)	Confirmada	21.0	85.74	298.36	0.00	257.67	641.77
070243	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION Y MONTAJE DE SUNCHO DE 12 PULG EN EL DUCTO A CARDENAS CARRETERA PLAYA LARGA	Confirmada	78.0	309.00	0.00	0.00	957.06	1,266.06
071053	Mantenimiento Proactivo	MONTAJE DE SUNCHO DE 12 PULG EN SOPORTE 240 Y DE SUNCHO DE 16 PULG EN SOPORTE 303 EN EL DUCTO A CARDENAS	Confirmada	48.0	200.10	0.00	0.00	588.96	789.06
071470	Averia	PONER SUNCHO EN EL OLEODUCTO CÁRDENAS	Confirmada	4.0	15.71	0.00	0.00	54.12	69.83
071572	Averia	CAMIO DE CODO Y MONTAR SUNCHO EN EL DUCTO A CÁRDENAS	Confirmada	35.0	153.70	195.28	472.95	473.55	1,295.48
072282	Mantenimiento Proactivo	MONTAR CON GRÚA DUCTO RESIDUALES A CARDENAS SOBRE PILOTES	Confirmada	15.0	52.23	0.00	0.00	184.05	236.28
072769	Mantenimiento Proactivo	FABICACION Y MONTAJE DE DOS SUNCHOS $\phi$ 16" EN LOS SOPORTES (304 Y 360) DEL DUCTO A CARDENAS	Confirmada	126.0	523.08	18.66	0.00	1,546.02	2,087.76
073201	Mantenimiento Preventivo	FABRICACION Y MONTAJE DE SUNCHO EN TUBERÍA $\phi$ 16" EN EL DUCTO A CARDENAS (SOPORTE 304.	Confirmada	105.0	429.69	57.24	0.00	1,288.35	1,775.28
073284	Mantenimiento Proactivo	MONTAJE DE SUNCHO DE $\phi$ 12" EN EL DUCTO A CARDENAS.	Confirmada	36.0	146.10	0.00	0.00	441.72	587.82
073802	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION Y MONTAJE DE DOS SUNCHOS UNO DE $\phi$ 16" EN EL SOPORTE 304 Y OTRO DE $\phi$ 12" EN EL SOPORTE 271.	Confirmada	75.0	321.21	18.66	0.00	920.25	1,260.12
073898	Averia	COGER SALIDERO EN DUCTO A CARDENAS(SALIDERO EN CODO)	Confirmada	28.0	116.60	31.58	220.89	378.84	747.91
073930	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION Y MONTAJE DE SUNCHO $\phi$ 16" PROXIMO AL SOPORTE 305 EN EL DUCTO A CARDENAS	Confirmada	27.0	116.16	18.66	0.00	331.29	466.11
074304	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION Y MONTAJE DE DOS SUNCHOS UNO ENTRE EL SOPORTE 169 Y 170 DE $\phi$ 12" Y OTRO ENTRE EL SOPORTE 304 Y 306 DE $\phi$ 16"	Confirmada	42.0	636.24	19.57	0.00	515.34	1,171.15
074407	Mantenimiento Proactivo	REPARAR SALIDEROS EN DUCTO RESIDUALES A CARDENAS Alc: revisión de traza p/identificar salideros, fabricar 1 suncho de 16pulg y montar 1 fabricado (Solic. GUSTAVO ZAMORA)	Confirmada	60.0	964.84	735.50	0.00	736.20	2,436.54
074526	Mantenimiento Proactivo	PONER EMPAQUETADURA A JERINGUILLA EN LA LINEA DEL DUCTO A CARDENAS	Confirmada	18.0	289.92	0.00	0.00	220.86	510.78
074736	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION Y MONTAJE DE SUNCHO DE $\phi$ 12" EN EL DUCTO A CARDENAS EN EL SOPORTE 247	Confirmada	30.0	517.80	0.00	0.00	368.10	885.90
									20,635.40
2022									
Cód OT	Clasificación OT	DESCRIPCIÓN	ESTADO	H/H	MANO OBRA	MATERIAL	Otros Costos	GASTO IND	TOTAL
075984	Mantenimiento Proactivo	REPARACION DE SALIDERO EN LA LINEA 16 PULG DEL DUCTO A CARDENAS EN EL SOPORTE 329 .	Confirmada	108	1856.52	737.35	0	1325.16	3919.03
076341	Mantenimiento Proactivo	COGER SALIDERO EN DUCTO A CARDENAS (CAMBIO DE CODO Y TRAMO)	Confirmada	84	1474.44	81.26	605.13	1136.52	3297.35
077529	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION Y MONTAJE DE SUNCHO $\phi$ 10" DE 400 MM DE LARGO EN EL SOPORTE 79 DEL DUCTO A CARDENAS	Confirmada	57	919.17	379.55	0	699.39	1998.11
077637	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION DE SUNCHO DE $\phi$ 12 PARA LINEA DEL DUCTO A CARDENAS SOPORTE 257	Confirmada	20	319.89	157.66	0	245.4	722.95
078038	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION DE 4 SUNCHOS PARA LA LINEA DEL DUCTO A CARDENAS DIMENSIONES ( $\phi$ 16" LONGITUD 1000MM, $\phi$ 16" LONGITUD 400MM, $\phi$ 12" LONGITUD 400MM, $\phi$ 10" LONGITUD 400MM)	Confirmada	126	1951.02	0	0	1546.02	3497.04
079233	Mantenimiento Proactivo	MONTAJE DE 2 SUNCHOS DE 16 PULG EN EL DUCTO A CARDENAS DETRAS DEL VIVERO	Confirmada	150	2322.06	0	0	1840.5	4162.56
079238	Mantenimiento Proactivo	MONTAJE DE SUNCHO EN EL SOPORTE 162 EN LINEA DE $\phi$ 12" DEL DUCTO A CARDENAS.	Confirmada	36	594	0	0	441.72	1035.72
079571	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION DE SUNCHO PARA LINEA DE $\phi$ 12" DEL DUCTO A CARDENAS PARA SOPORTE 223 Y MONTAJE DEL MISMO	Confirmada	60	959.16	193.41	0	736.2	1888.77
079572	Mantenimiento Proactivo	FABRICACION DE DOS SUNCHOS DE $\phi$ 12" PARA EL DUCTO A CARDENAS	Confirmada	60	959.16	91.09	0	736.2	1786.45
079600	Mantenimiento Proactivo	TRATAMIENTO ANTICORROSIVO DE TUBERIA DUCTO A CARDENAS DE BATERIA CENTRAL	Confirmada	104	1728.8	30252.84	0	2256.8	34238.44
079962	Averia	PONER SUNCHO EN EL DUCTO A CARDENAS	Confirmada	21	334.17	0	94.75	284.13	713.05
081898	Mantenimiento Preventivo	FABRICACION Y MONTAJE DE SUNCHO DE 12 PULG EN BATERIA CENTRAL	Confirmada	110	1703.7	223.09	0	1349.7	3276.49
									60,535.96

Fuente: EPEP Centro UEB de mantenimiento

Como se observa en la tabla 3.7 a medida que pasa el tiempo aumenta exponencialmente las averías del ducto a Cárdenas por el deterioro del mismo, dado alto grado de corrosión que presenta la tubería y que aumenta en la medida que se le ponga los sunchos ya que los mismos provocan corrosión por par galvánico debilitando más aún la estructura del ducto.

Además, cada vez que ocurre una avería en el ducto se para el bombeo hacia el punto de inyección aumentando así los niveles de agua en la PPC lo que provoca un aumento de los ciclos tecnológicos y atraso en las ventas de petróleo.

Por todo lo antes expuesto se considera más factible el montaje de la nueva tubería de polietileno de PEAD con un diámetro de 10" con la cual se satisface todas las variantes de bombes: variante 1 (bombear todo el flujo al punto de inyección a Cárdenas o al pozo Cuchillo 2 en Birama) y variante 2 (bombear 600 m<sup>3</sup>/día al pozo Cuchillo 2 y el resto al punto de inyección de Cárdenas).

## CONCLUSIONES

1. 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.
2. La simulación de los casos de estudio permitió calcular las caídas de presiones de los sistemas propuestos y analizar cómo influyen las variables de operación.
3. La bomba instalada, cumple los requerimientos técnicos operacionales de (H, Q, NPSH) del proceso para las variantes analizadas.
4. Se selecciona el diámetro de la tubería de 10" de polietileno de alta densidad como material a emplear en el diseño del sistema propuesto.
5. El costo de adquisición de la tubería de 10" es de 973 463,4 €.

## 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

- Alfonso Sámano, Diego. (2002). Mecánica de fluidos. México: Compañía Editorial Continental. 77p
- 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 septiembre 2022] Disponible en: <http://www.nber.org/papers/w10538>
- Bernal, E. O., y González, F. V., (2016). Análisis de ariables que intervienen en el diseño de oleoductos para el transporte de crudos pesados [Trabajo realizado para optar al título de Especialista en Producción de Hidrocarburos] Universidad Industrial de Stander.
- Campbell, M. (2010). The Move to the Middle: Convergence of the Open-Source and Proprietary Software Industries [en línea] [Consulta: 11 septiembre 2022] Disponible en: <http://www.tandfonline.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.
- Domínguez, Jorge A, *et al.* (1987). Introducción a la corrosión y protección de metales. La Habana: Ediciones ENPES.
- EPEP Centro. (2015 a). Informe del Sistema de Residuales. Planta de Tratamiento de residuales.
- EPEP Centro. (2015 b). Informe de tiempo y disponibilidad de equipos. Área de tratamiento. Planta de procesamiento de Crudo.
- EPEP Centro, (2019). 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.
- EPEP Centro (2021). Reglamento Tecnológico. Sistemas de aguas residuales.

- García, C. G. (2015). Diseño de la infraestructura de transporte del agua residual de la EPEP Centro [Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero Químico, Universidad de Matanzas]
- Geankoplis, C. J., (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3ra Edición. México: Compañía Editorial Continental, S.A.
- Gómez, A. P. (2016). Selección de una variante de instalación de la sección A del oleoducto Matanzas-Santa Cruz [Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniero Químico, Universidad de Matanzas]
- González, Vicente. (2004). Ingeniería de Procesos. Apuntes para un Libro de Texto. Universidad Central de Las Villas.
- Greene, R. W., (1995). Válvulas. Selección, uso y mantenimiento. New York: MC Graw - Hill. 215p
- Gotera Valbuena; Eddin Rafael. (2017). Una guía para el diseño de tuberías. [en línea]. [Consulta: 15 septiembre 2022]. Disponible en: <http://monografias.com>
- 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: 15 septiembre 2022]. Disponible en: <http://www.cepmagazine.org>
- Haydary, J. (2019). Chemical Process Design and Simulation. First Edition
- Ingeniería Química. (2020, 4 de junio). Conceptos básicos de simulación de procesos químicos. [en línea]. [Consulta: 15 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/>
- Ingeniería Química. (2021, julio). Que es Aspen Hysys. [Consulta: 15 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/>
- King, R. P., (2002). *Introduction to Practical Fluid Flow*. Oxford: Butterworth - Heinemann. 198p
- Kundu, P. K., (2002). Fluid Mechanics. Second Edition ed. New York: Elsevier Science.
- 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: 11 Septiembre 2022]. Disponible en: <http://Monografias.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
- NC ISO 4427-1: 2015 Plásticos – Sistemas de tuberías plásticas –tubos y accesorios de polietileno (PE) para el suministro de agua – Parte 1: Generalidades.
- NC ISO 4427-2:2015 Plásticos - Sistemas de tuberías plásticas –tubos y accesorios de polietileno (PE) para el suministro de agua – Parte 2: Tubos.
- NC-ISO 4427- 5: 2017 Plásticos – Sistemas de tuberías plásticas – tubos y accesorios de polietileno (PE) para el suministro de agua – Parte 5: Idoneidad para los objetivos del sistema.
- NC-EN 12666-1: 2017 Sistemas de canalización en materiales plásticos para evacuación y saneamiento enterrado sin presión-polietileno (PE)- Parte 1: Especificaciones para tubos, accesorios y el sistema.
- NC-ISO 4427- 3: 2017 Sistema de tuberías plásticas – Tubos y accesorios de polietileno (PE) para el suministro de agua – Parte 3: Accesorios.
- NC 969: 2013 Tuberías presurizadas de polietileno – Especificaciones para el cálculo, diseño, transportación, manipulación, almacenamiento y colocación.
- Procesos Industriales. (2016). Simulación de los procesos industriales. [en línea] [Consulta: 11 Septiembre 2022]. Disponible en: <https://simulaciónprocesosindustriales.blogspot.com/>.
- Rennels, D. C., y Hudson, H. M., (2012). Pipe Flow. A Practical and Comprehensive Guide. A Jhon Wiley and Sons, INC.

- Rosabal, J. (2006). Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. Ministerio de Educación Superior tomo II. La Habana: ENPES.
- Zamora, Blas. (2009). Enseñanza de Temas Avanzados de Mecánica de Fluidos usando Dinámica de Fluidos Computacional. [en línea]. [Consulta: 17 septiembre 2022]. Disponible en <http://www.scielo.org/>

# ANEXOS

## Anexo 1

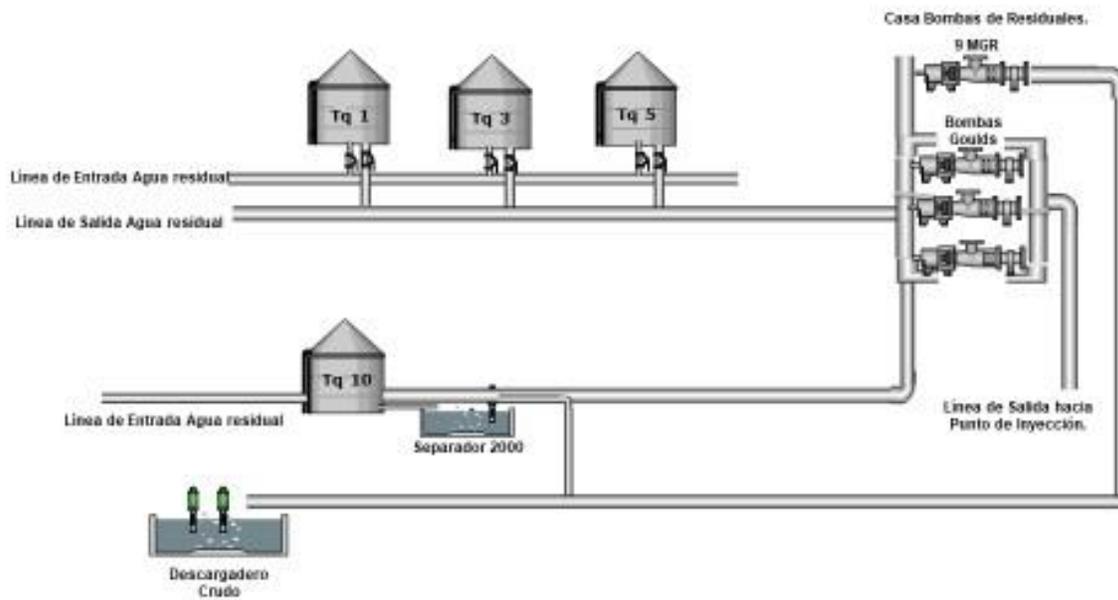


Figura A.1. Diagrama de flujo del sistema de residuales de Batería Central.

Fuente: EPEP Centro (2021).

## Anexo 2

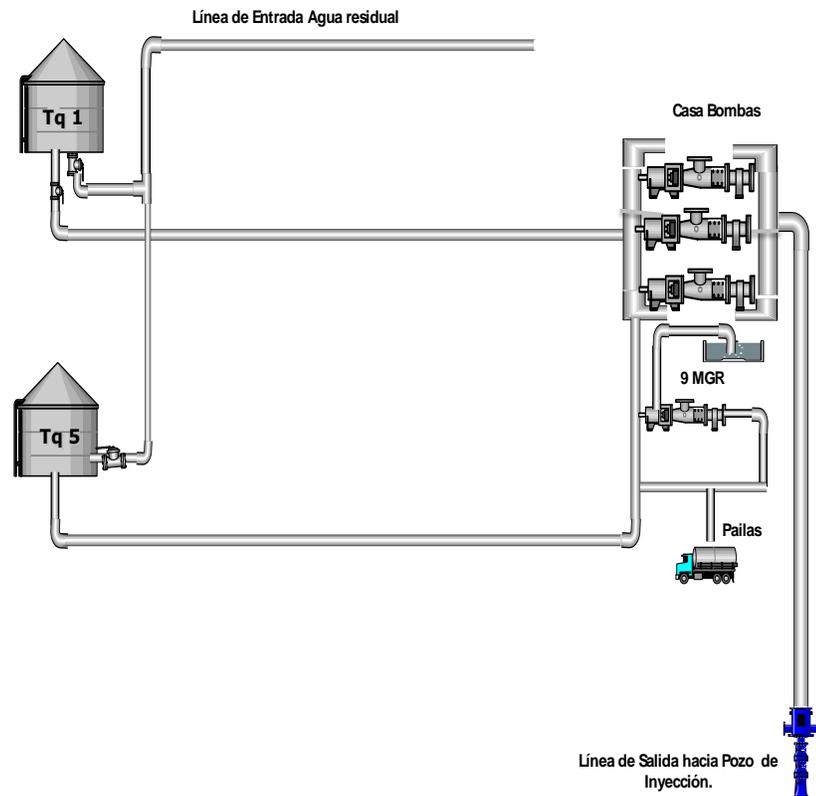


Figura A.2. Diagrama de flujo del sistema de inyección de la Batería de Cárdenas.  
Fuente: EPEP Centro (2021)

### Anexo 3

Tabla A.1. Resumen de las correlaciones disponibles en HYSYS.

Correlación	Descripción	Aplicabilidad de geometría de tubería			Vertical	Referencia
		Horizontal	Inclinación hacia arriba	Inclinación hacia abajo		
HTFS	La correlación HTFS es un método de propósito general desarrollado para aplicarse en una amplia gama de condiciones. No predice el régimen de flujo. La correlación se comparó con resultados experimentales para sistemas de aire-agua y mercurio	Si	Si	Si	No	
Beggs y Brill	La correlación de Beggs y Brill fue el primer método desarrollado para aplicarse a todos los ángulos de inclinación de la tubería. Utiliza un mapa de régimen de flujo derivado empíricamente que se aplica solo al flujo horizontal. tubos transparentes para determinar el patrón de	Si	Si	Si	No	(11,12)

	<p>flujo que podría estar inclinado en cualquier ángulo. Esta correlación incluye la corrección de caída de presión por fricción para tuberías rugosas y la corrección de retención de líquido para flujo cuesta arriba y cuesta abajo desarrollada por Payne et al. (12).</p>					
Duns y Ros	<p>La correlación de Duns y Ros se basa en un amplio conjunto de experimentos de laboratorio financiados por Shell Oil. En estos experimentos, Duns and Ros registraron el patrón de flujo real y la retención de líquido mediante un trazador radiactivo. tiene correlaciones separadas para diferentes regímenes de flujo vertical (burbuja, slug, transición y flujo de niebla). Sin embargo, esta correlación no se recomienda para el agua.</p>	No	No	No	Si	(13)

Orkiszewski	Orkiszewski realizó un riguroso análisis de las correlaciones existentes e intentó comprender sus precisiones. Con base en sus cálculos, la “correlación” de Orkiszewski utiliza la correlación más precisa para un régimen de flujo determinado: Flujo de burbujas: Correlación de Griffith Slugflow: Flujo de transición Griffith-Wallis modificado: Duns y Ros Flujo de niebla: Duns y Ros Orkiszewski no solo determinó qué correlación es la mejor para un flujo en particular pero también modificó la correlación en el régimen de slugflow.	No	No	No	Si	(14)
Aziz, Govier y Fogarasi	Aziz, Govier y Fogarasi desarrollaron una correlación utilizando datos del flujo de gas y condensado en pozos verticales. Esta correlación tuvo en cuenta los regímenes de flujo vertical: flujos de	No	No	No	Si	(15)

	<p>burbuja, slug, de transición y de neblina. en los regímenes de transición y niebla.</p>					
<p>Hagedorn y Brown</p>	<p>Hagedorn y Brown desarrollaron una correlación usando datos de experimentos que involucraban el flujo vertical a través de un pozo de 1500 pies. La correlación original fue posteriormente modificada por Hagedorn y Brown para mejorar su precisión. Los experimentos probaron tres tamaños de tubería diferentes (1, 1,25 y 1,5 pulgadas) y mezclas de agua-aire-petróleo crudo. La correlación de Hagedorn-Brown no considera el régimen de flujo sino que realiza un cálculo simplificado que es independiente del</p>	No	No	No	Si	(16)

	patrón de flujo. La correlación resultante se usa ampliamente en sistemas de flujo vertical.					
Lockhart y Martinelli	Lockhart y Martinelli desarrollaron una de las primeras correlaciones empíricas para el flujo bifásico horizontal. No consideraron los patrones de flujo ni tuvieron en cuenta el término de aceleración en la ecuación de gradiente de presión. También correlacionaron únicamente datos obtenidos de experimentos con tuberías de 1 pulgada de diámetro.	Si	No	No	No	(17)

Dukler	Dukler propuso una nueva correlación para el flujo de tubería horizontal basada en experimentos con diferentes medidores de tubería. La correlación no considera los regímenes de flujo pero proporciona un esquema iterativo para la determinación de la retención de líquido. Este método proporciona un nuevo mapa de régimen de flujo para el flujo horizontal.	Si	No	No	No	
Gregory, Aziz y Mandhane	El método de Gregory, Aziz y Mandhane introdujo un nuevo mapa de régimen de flujo para el flujo horizontal.	Si	Si (para inclinaciones menores a 30°)	Sí (para inclinaciones menores de 30°)	No	(18)
Gas adiabático	El método de gas adiabático es un método de gas comprimible que asume una expansión diabática de gas a medida que pasa a lo largo de la tubería. Se ignora la pérdida de presión debido al cambio en la elevación.	Si	No	No	No	

Gas isotérmico	El método de gas isotérmico es un método de gas comprimible que supone una expansión de gas diferente al pasar a lo largo de la tubería. Se ignora la pérdida de presión debida al cambio en la elevación.	Si	No	No		
----------------	--	----	----	----	--	--

Fuente: Pipe flow. A practical and comprehensive guide.

## Anexo 4

Tabla A.2. Tramo PPC a Cárdenas.

PPC a Cárdenas	
S (m)	z (m)
0	0
190	7
315	7
428	7
551	7
566	7
593	7
602	7
659	7
667	7
753	7
1169	7
1359	7.2
1569	7.5
1819	7.7
1869	8
2069	8.3
2269	8.5
2369	8.9
2569	10.4
2769	10.8
2971	11
2971.5	10.8
2972	10.6
2972.5	10.5

2973	10.5
2973.5	10.5
2973.6	10.6
2973.8	10.7
2974.1	11
3074.1	12
3174.1	13
3274.1	13.5
3374.1	13.4
3474.1	14.5
3574.1	16
3674.1	17
3774.1	16.5
3874.1	18.5
3974.1	19.5
4074.1	19
4174.1	20
4274.1	21
4374.1	22
4474.1	22.5
4585.1	23
4586.1	22.8
4586.6	22.5
4587.1	22.5
4587.6	22.8
4588.1	23
4618.1	23
4658.1	23
4668.1	23

4685.1	24
4985.1	24.5
5085.1	25
5185.1	25.6
5385.1	26.5
5585.1	27
5685.1	27.5
5985.1	28
6285.1	27.5
6585.1	27
6785.1	26
6825.1	24.5
6845.1	24
6915.1	23
6965.1	22.5
7035.1	22
7075.1	21.5
7105.1	21
7125.1	19.5
7185.1	19.3
7285.1	19.2
7299.1	19
7349.1	19.7
7354.1	19.7
7419.1	19.7
7424.1	19.7
7449.1	19.7
7499.1	19.1
7509.1	18.8

7599.1	18.5
7719.1	18.2
7799.1	18
7899.1	17.6
7949.1	17.4
8049.1	17
8081.1	16.7
8281.1	15.7
8381.1	14.7
8481.1	13.7
8681.1	12.7
8781.1	11.2
8981.1	10.1
9081.1	9.2
9211.1	8.7
9281.1	8.2
9331.1	7.2
9407.1	6.7
9477.1	6.2
9507.1	6
9557.1	6.1
9607.1	5.9
9637.1	6
9677.1	5.7
9757.1	5.9
9857.1	5.4
9957.1	5.7
9987.1	5.5
10028.1	5.7

10360.6	5.7
10693.1	5.7

Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 5

Tabla A.2. Tramo PPC a Birama.

PPC a Birama	
S (m)	z (m)
0	0
190	7
315	7
428	7
551	7
566	7
593	7
602	7
659	7
667	7
753	7
1169	7
1359	7.2
1569	7.5
1819	7.7
1869	8
2069	8.3
2269	8.5
2369	8.9
2569	10.4
2769	10.8
2971	11
2971.5	10.8

2972	10.6
2972.5	10.5
2973	10.5
2973.5	10.5
2973.6	10.6
2973.8	10.7
2974.1	11
3074.1	12
3174.1	13
3274.1	13.5
3374.1	13.4
3474.1	14.5
3574.1	16
3674.1	17
3774.1	16.5
3874.1	18.5
3974.1	19.5
4074.1	19
4174.1	20
4274.1	21
4374.1	22
4474.1	22.5
4585.1	23
4586.1	22.8
4586.6	22.5
4587.1	22.5
4587.6	22.8
4588.1	23
4618.1	23

4658.1	23
4668.1	23
4685.1	24
4985.1	24.5
5085.1	25
5185.1	25.6
5385.1	26.5
5585.1	27
5685.1	27.5
5985.1	28
5985.1	28
6060.98	25.54
6139.91	24.04
6195.88	22.68
6205.17	22.64
6216.73	22.12
6232.27	21.85
6244.01	21.65
6256.85	21.07
6285.67	20.69

Fuente: Elaboración propia.

## Anexo 6

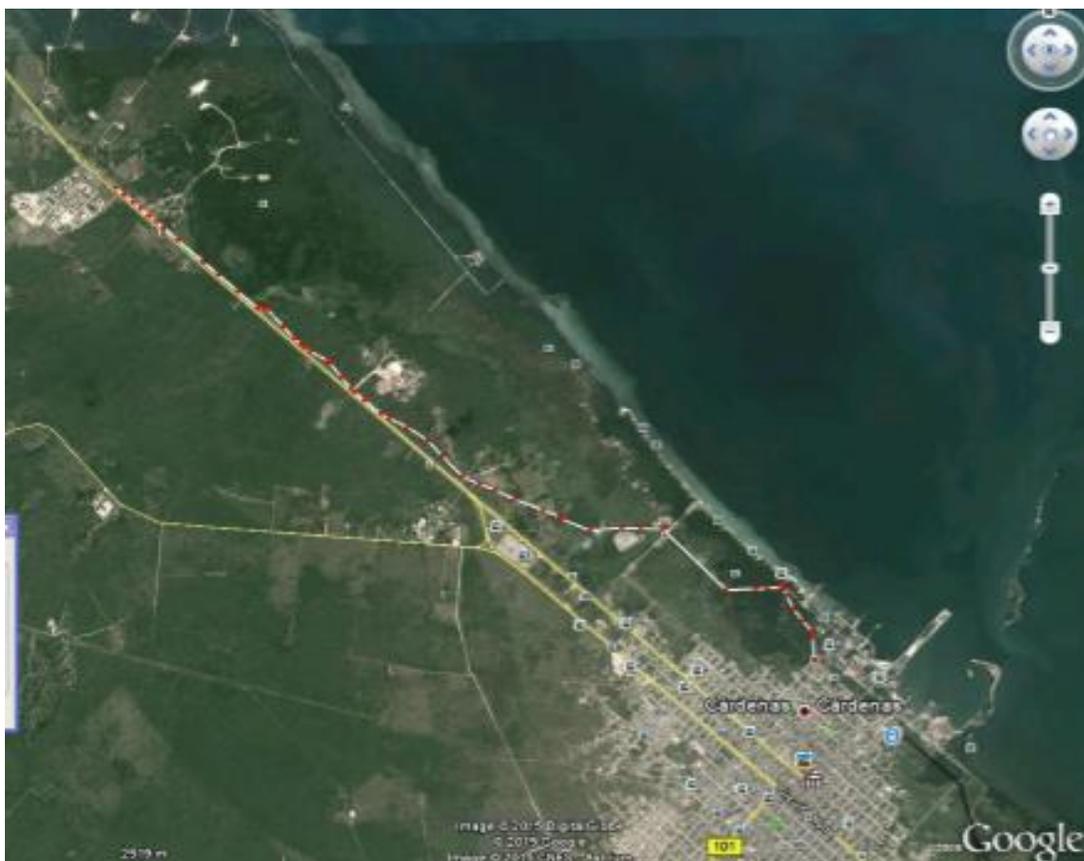


Figura A.3. Vista satelital de la infraestructura de transporte de agua residual de la EPEP Centro.

Fuente: Programa *Googleearth*