



**UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABI
FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

TRABAJO DE TITULACIÓN:

PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

TEMA:

“MODELACIÓN MATEMÁTICA Y EMULACIÓN DEL ACUEDUCTO EL AROMO
LA ESPERANZA DE LA PROVINCIA DE MANABÍ”

DIRECTOR DE TESIS:

ING. ANGEL MOREIRA

AUTOR:

COELLAR ZAMBRANO SERGIO RIGOBERTO

MANTA – MANABÍ - ECUADOR

2016 – 2017

UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABI



FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL

TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA:

“MODELACIÓN MATEMÁTICA Y EMULACIÓN DEL ACUEDUCTO EL AROMO
LA ESPERANZA DE LA PROVINCIA DE MANABÍ”

AUTORES:

COELLAR ZAMBRANO SERGIO RIGOBERTO

MANTA – MANABÍ - ECUADOR

2016 – 2017

AUTORIA

La responsabilidad de los hechos, ideas y doctrinas expuestas en este proyecto, a excepción de las citas bibliográficas y demás fuentes de información, corresponden única y exclusivamente a los autores y el patrimonio intelectual del proyecto corresponde a la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí.

Coellar Zambrano Sergio Rigoberto

C.I 131492699-7

CERTIFICACIÓN

Yo, Ing. Ángel Moreira, catedrático de la facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí; en calidad de Director de tesis, certifico que el presente trabajo fue desarrollado bajo mi dirección, orientación y supervisión; sin embargo, el proceso de investigación, los conceptos y resultados son de exclusiva responsabilidad del graduado Sergio Rigoberto Coellar Zambrano, cuyo trabajo de titulación tiene como tema **“MODELACIÓN MATEMÁTICA Y EMULACIÓN DEL ACUEDUCTO EL AROMO LA ESPERANZA DE LA PROVINCIA DE MANABÍ”** habiendo cumplido con las disposiciones establecidas para el efecto.

Ing. Ángel Moreira

DIRECTOR DE TESIS

UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“MODELACIÓN MATEMÁTICA Y EMULACIÓN DEL ACUEDUCTO EL AROMO
LA ESPERANZA DE LA PROVINCIA DE MANABÍ”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Sometido a consideración del Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, como requisito previo a la obtención del título de INGENIERO INDUSTRIAL.

Aprobado por el tribunal examinador:

Ing. Emilio Loor Mendoza

DECANO

Ing. Ángel Moreira

DIRECTOR DE TESIS

JURADO EXAMINADOR

JURADO EXAMINADOR

DEDICATORIA

Me gustaría dedicar este proyecto de investigación a mis padres y mis tías que gracias a ellos pude alcanzar mi título de Ingeniería Industrial, ya que me ayudaron durante todo este tiempo en lo material y en lo moral

Para mis padres por su comprensión y ayuda en momentos malos y buenos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, todo ello sin pedir nunca nada a cambio, nunca les podré estar suficientemente agradecido.

A todos ellos, muchas gracias de todo corazón.

RECONOCIMIENTO

La realización de este proyecto de investigación fue posible gracias a la cooperación brindada por el Ing. Ángel Moreira docente encargado de la materia de mecánica de fluidos y al personal de la Refinería Del Pacifico.

Se agradece a todas aquellas personas que en forma directa o indirecta contribuyeron a que este trabajo de investigación pudiera llevarse a cabo. Por último un agradecimiento profundo a mis padres por su constante paciencia y apoyo que siempre demostraron.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	3
2.2 BASES TEÓRICAS.....	6
2.3 MARCO CONCEPTUAL	14
3. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES DEL ACUEDUCTO.....	16
3.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES.....	16
3.2 RÉGIMEN DEL SISTEMA.....	22
4. PROPUESTA DE MODELACIÓN MATEMÁTICA Y EMULACIÓN DEL ACUEDUCTO.....	24
4.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	24
4.2 POSIBLES ESCENARIOS	34
4.3 ERROR RELATIVO	39
5. CONCLUSIONES.....	45
6. RECOMENDACIONES	45
7. BIBLIOGRAFÍA	46
8. ANEXOS	48

RESUMEN

El presente proyecto de investigación presentó información y el cálculo de las distintas cargas de trabajo, en el trayecto del acueducto del “Aromo La Esperanza” de la provincia de Manabí, que se necesitaran en posibles escenarios, así como las presiones y velocidades que se desarrollen para su correcto funcionamiento y evitar posibles fallas.

En el diagnóstico de las condiciones del acueducto se consideró los caudales que se desarrollaran en el acueducto cuando esté en pleno funcionamiento si todas las derivaciones están suministrando líquido vital, así como el tipo de flujo que se alcanzará a lo largo del trayecto.

En la propuesta de la modelación matemática y emulación se planteó las ecuaciones a usar con respecto a las condiciones del acueducto en cada punto del trayecto y se desarrollan en un escenario de máxima necesidad de caudal. También se realizó el mismo procedimiento para el resto de los escenarios planteados y se consideró un error relativo para la modelación diseñada.

ABSTRACT

The present research project presented information and calculation of the different workloads, in the “Aromo La Esperanza” aqueduct path of the province of Manabí, which will be needed in possible scenarios, as well as the pressures and speeds that are developed for its correct operation and to avoid possible faults.

In the diagnostic of the conditions of the aqueduct, it was considered the flows that will be developed in the aqueduct when it is in full operation if all the derivations are supplying vital liquid, as well as the type of flow that will be reached along the path.

In the proposal of mathematical modeling and emulation the equations to be used with respect to the aqueduct conditions at each point of the path were proposed and developed in a scenario of maximum flow requirement. This same procedure was also performed for the rest of the scenarios raised and was considered a relative error for the designed modeling.

En casos como estos, se necesitan emplear fundamentos teóricos de autores como Bernoulli, Newton, Hazen Williams, Darcy-Weisbach, Reynolds, Moody; así también, se deberá emplear métodos numéricos si por la cantidad de variables involucradas, estas no puedan ser fácilmente halladas.

Adicionalmente se debe contrastar con un programa de emulación del acueducto a fin de verificar su funcionamiento y la modelación matemática.

1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

- Elaborar la modelación matemática y emulación del acueducto el aramo la esperanza de la provincia de Manabí para su correcto funcionamiento y evitar posibles fallos.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información sobre mecánica de fluidos con referencia a acueductos ramificados abiertos.
- Valorar los fundamentos teóricos de la información.
- Diagnosticar la situación actual del acueducto.
- Elaborar la modelación matemática del acueducto.
- Aplicar la emulación del acueducto y comprobar la modelación matemática.
- Valorar los resultados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

El diseño de acueductos, es una base importante para el desarrollo integral de una comunidad, la construcción de un sistema adecuado para el suministro de agua potable que cuente con todos los elementos técnicos se hace indispensable para mejorar la calidad de vida de una población, a raíz de esto el hombre a partir de conocimientos y experiencias ha podido desarrollar métodos para la construcción de dichas estructuras. (Alvarez, 2014)

Para la transmisión de agua mediante bombeo, se puede calcular la pérdida de carga correspondiente a la escala de flujo señalado para cualquier diámetro de tubería, usando cuadros y monografías. La carga de la bomba es la carga total, esto es, la carga estática más la pérdida de carga por fricción para la tasa del flujo señalado. La bomba seleccionada debe ser capaz de proveer esta carga. (CIR, 1983)

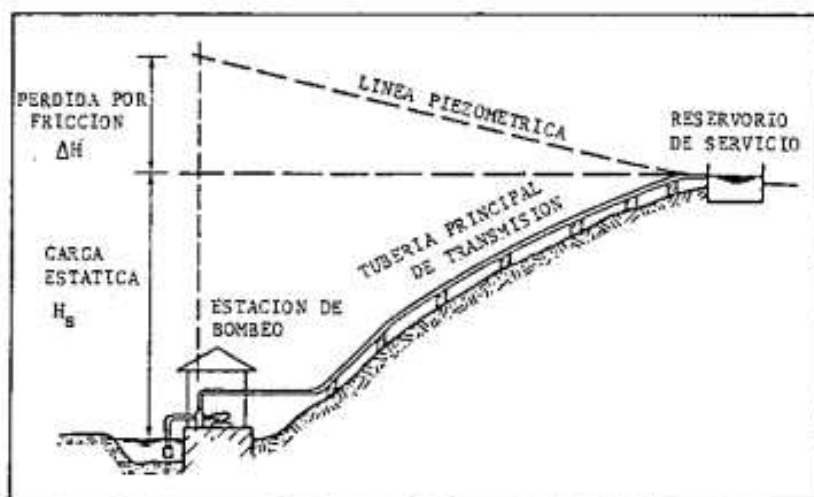


Imagen2 Abastecimiento mediante bombeo (CIR, 1983)

Refinería del Pacífico Eloy Alfaro (RDP) suscribió convenios específicos con los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD) de Jaramijó, Montecristi y Manta para la construcción de líneas de aducción, entre los puntos de derivaciones del proyecto Acueducto La Esperanza – RDP hasta las plantas de tratamiento de agua potable de estos cantones. La gestión forma parte de los convenios marco de cooperación interinstitucional que Refinería del Pacífico mantiene con los GAD antes mencionados, ratificando la responsabilidad social que ejecuta este megaproyecto del Gobierno Nacional.

El objetivo principal del Acueducto RDP es abastecer de agua a la refinería para su operación, con una capacidad de diseño de 6.600 m³ de agua cruda por hora, de los cuales se destinarán 2.000 m³/hora para ser distribuidos a Jaramijó (300 m³/hora), Montecristi (450 m³/hora) y Manta (1.250 m³/hora); de esta forma, se materializa el aprovechamiento del agua del embalse La Esperanza, lo que constituye un importante aporte al desarrollo del área de influencia de Refinería del Pacífico.

La inversión del Acueducto RDP es de 275 millones de dólares y ha generado plazas de trabajo a más de 1.300 personas, de las cuales el 68% pertenecen a Manabí.

La casa de bombas se construye junto a la represa La Esperanza, en el norte de Manabí y forma parte del acueducto que dotará de agua cruda a Refinería del Pacífico, situada al sur de la región. Se ejecuta en una superficie de 1.516 m².

En la obra fueron instaladas seis bombas, que sumarán un total de 6.600 metros cúbicos por hora de impulsión. Cuenta además con un puente grúa para el montaje, desmontaje y mantenimiento.

Se colocaron válvulas cónicas en cada una de las salidas de las líneas de aducción, que permitirá una descarga de agua cruda de manera controlada.

El acueducto que se construye desde la represa La Esperanza hasta el sitio de implantación de Refinería del Pacífico en El Aromo, comprende una ruta de

tuberías de 93 kilómetros que cruzan de norte a sur los límites de cinco cantones manabitas. La tubería será enterrada en su totalidad, una vez que se someta a pruebas hidrostáticas.

Una parte del caudal de agua cruda se entregará a los municipios de Manta, Montecristi y Jaramijó, ubicados en el área de influencia de la refinería y éstos a su vez se encargarán de potabilizarla y distribuirla a la población, considerando la competencia que tienen sobre el agua. (Refinería del Pacífico, 2016)

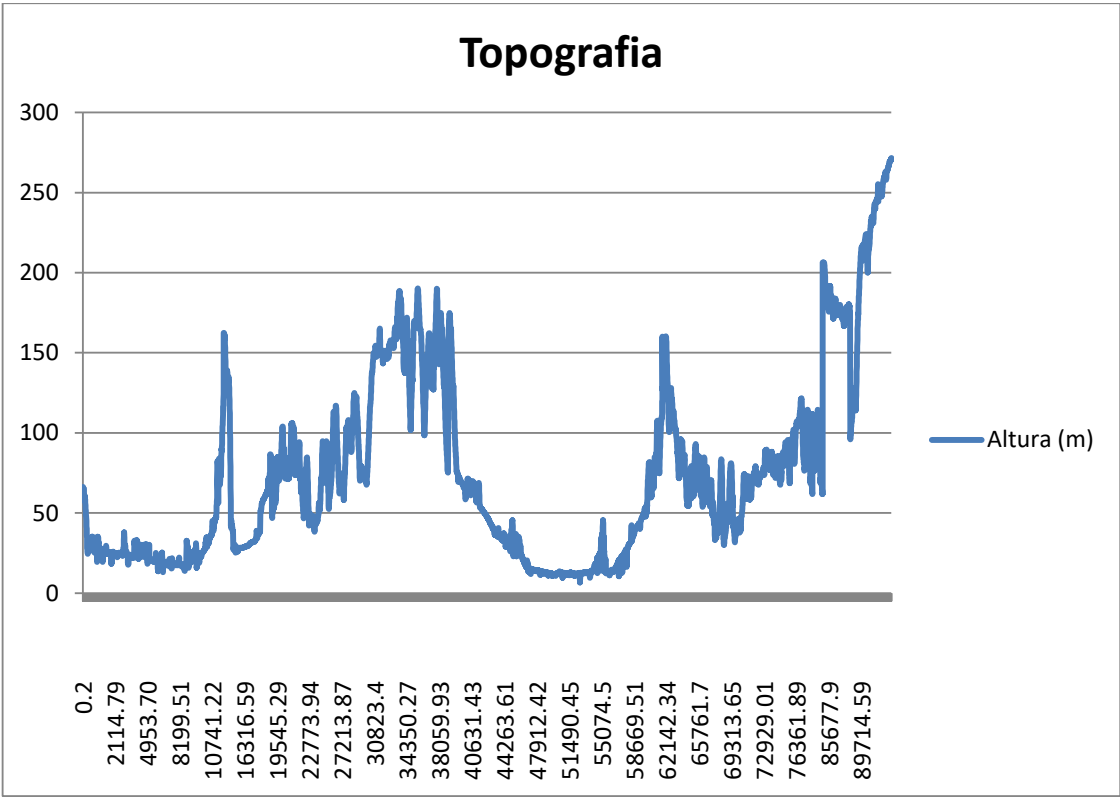


Imagen3 Topografía de la tubería desde la presa la Esperanza hasta la Refinería, (Derecho de autoría del investigador)

2.2 BASES TEÓRICAS

Ecuación de la continuidad

La conservación de la masa de fluido a través de dos secciones (sean éstas A1 y A2) de un conducto (tubería) o tubo de corriente establece que: la masa que entra es igual a la masa que sale. (Shames, 1995)

La ecuación de continuidad se puede expresar como:

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

Cuando $\rho_1 = \rho_2$ que es el caso general tratándose de agua, y flujo en régimen permanente, se tiene:

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

O de otra forma:

$$Q_1 = Q_2 \text{ (el caudal que entra es igual al que sale)}$$

Dónde:

Q = caudal (metro cúbico por segundo; m³/s)

V = velocidad (m/s)

A = área transversal del tubo de corriente o conducto (m²)

Esta situación se cumple cuando entre dos secciones de la conducción no se acumula masa. Esta condición la satisfacen todos los líquidos y, particularmente, el agua.

En general la geometría del conducto es conocida, por lo que el problema se reduce a estimar la velocidad media del fluido en una sección dada.

Caudal (fluido)

En dinámica de fluidos, caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto (tubería, cañería, oleoducto, río, canal,...) por unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

En el caso de que el flujo sea normal a la superficie o sección considerada, de área A , entre el caudal y la velocidad promedio del fluido existe la relación:

$$Q = A \cdot V$$

Numero de Reynolds

El número de Reynolds se puede definir como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Éste relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional, que interviene en numerosos problemas de dinámica de fluidos. Dicho número o combinación adimensional aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). (Streeter, 2000)

Para un fluido que circula por el interior de una tubería circular recta, el número de Reynolds viene dado por:

$$Re = \frac{\bar{v}_s D}{\nu}$$

En donde:

\bar{v}_s : Velocidad característica del fluido

D : Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema

ν : Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

Principio de Bernoulli

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción que hay entre el líquido y la pared de la tubería; tales energías traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo.

En estructuras largas, las pérdidas por fricción son muy importantes, por lo que ha sido objeto de investigaciones teóricas experimentales para llegar a soluciones satisfactorias de fácil aplicación.

Para estudiar el problema de la resistencia al flujo resulta necesario volver a la clasificación inicial de los flujos laminar y turbulento.

El método más común para transportar un flujo es impulsarlo por un sistema de tuberías. Las tuberías que podemos encontrar frecuentemente son las de sección circular, ya que ofrecen mayor resistencia estructural y mayor sección transversal. (Mott, 2006)

La ecuación de la energía será pieza clave para estudiar las pérdidas de energía por fricción y accesorios:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + gH_p$$

En donde:

p = Presión absoluta del fluido ()

ρ = Densidad del fluido

V = Velocidad del fluido

g = Gravedad

Z = Altura

H_p = Pérdidas de energía por fricción y accesorios

Ecuación de Darcy-Weisbach

En el análisis de los sistemas de tuberías, las pérdidas de presión comúnmente se expresan en términos de la altura de la columna de fluido equivalente, llamada pérdida de carga h_L . Note a partir de la estática de fluidos que $\Delta P = \rho g h$ y, por tanto, una diferencia de presión de ΔP corresponde a una altura de fluido de $h = \Delta P / \rho g$, la pérdida de carga de tubería se obtiene cuando se divide ΔP_L entre ρg , para obtener:

$$\text{Pérdida de carga:} \quad h = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

h = pérdida de carga debida a la fricción. (m)

f = factor de fricción de Darcy. (Adimensional)

L = longitud de la tubería. (m)

D = diámetro de la tubería. (m)

V = velocidad media del fluido. (m/s)

g = aceleración de la gravedad $\approx 9,80665 \text{ m/s}^2$

La pérdida de carga h representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería. La pérdida de carga se produce por la viscosidad y se relaciona directamente con el esfuerzo de corte de la pared del tubo. (Yunes A. Çengel, John M. Cimbala, 2006)

Esta fórmula permite la evaluación apropiada del efecto de cada uno de los factores que inciden en la pérdida de energía en una tubería. Es una de las pocas expresiones que agrupan estos factores. La ventaja de esta fórmula es que puede aplicarse a todos los tipos de flujo hidráulico (laminar, transicional y turbulento), debiendo el coeficiente de fricción tomar los valores adecuados, según corresponda.

Ecuación de Swamee-Jain

El factor de fricción o coeficiente de resistencia (f) es un parámetro adimensional que se utiliza en dinámica de fluidos para calcular la pérdida de carga en una tubería debido a la fricción.

Esta ecuación fue desarrollada en 1976, por los investigadores Prabhata K. Swamee y Akalank K. Jain. En ella se tienen en cuenta la rugosidad del material, " k " o " ϵ "; el diámetro interno de la tubería, " D "; y el Reynolds del flujo, Re . El cociente k/D se conoce también como "Rugosidad relativa", del material. El cálculo realizado es directo, sin iteraciones, solamente se reemplazan los valores del Reynolds y de la Rugosidad relativa y se calcula el coeficiente de fricción. Se puede catalogar como una ecuación explícita para el cálculo del factor de fricción. (White, 2008)

$$f = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) \right]^2}$$

Pérdidas de carga localizadas

Las pérdidas de carga localizadas o pérdidas secundarias son pérdidas de carga debidas a elementos singulares de la tubería tales como codos, estrechamientos, válvulas, etc. (White, 2008)

Las pérdidas localizadas se expresan como una fracción de la forma:

$$h_v = K \frac{V^2}{2g}$$

h_v = pérdida de carga localizada;

V = velocidad media del agua, antes o después del punto singular

K = Coeficiente determinado en forma empírica para cada tipo de punto singular

Número de combinaciones

Partiendo de un número n de variables, cada una de las cuales puede tomar el valor verdadero: V, o falso: F, por Combinatoria, podemos saber que el número total de combinaciones: N_c , que se pueden presentar es:

$$N_c = 2^n$$

El número de combinaciones que se pueden dar con n variables, cada una de las cuales puede tomar uno entre dos valores lógicos es de dos elevado a n , esto es, el número de combinaciones: N_c , tiene crecimiento exponencial respecto al número de variable n (Wikipedia, 2016):

n	N_c
0	1
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
...	...
n	2^n

Error de aproximación

La incertidumbre o error numérico es una medida del ajuste o cálculo de una magnitud con respecto al valor real o teórico que dicha magnitud tiene. Un aspecto importante de los errores de aproximación es su estabilidad numérica. Dicha estabilidad se refiere a cómo dentro de un algoritmo de análisis numérico el error de aproximación es propagado dentro del propio algoritmo.

El concepto de error es consustancial con el cálculo numérico. En todos los problemas es fundamental hacer un seguimiento de los errores cometidos a fin de poder estimar el grado de aproximación de la solución que se obtiene.

$$\text{error absoluto} = |\text{valor medido} - \text{valor real}|$$

Puede ser positivo, error por exceso, o negativo, error por defecto.

$$\text{error relativo} = \frac{\text{error absoluto}}{\text{valor real}}$$

Si el error absoluto $< \varepsilon$, se dice que es una cota de error absoluto. Entonces la ε relativa es:

$$\frac{\varepsilon}{\text{valor real}} = \frac{\varepsilon}{\text{valor de medición}}$$

Dentro de este grupo se incluyen aquellos en los que la definición matemática del problema es sólo una aproximación a la situación física real.

Estos errores son normalmente despreciables; por ejemplo, el que se comete al obviar los efectos relativistas en la solución de un problema de mecánica clásica.

En aquellos casos en que estos errores no son realmente despreciables, nuestra solución será poco precisa independientemente de la precisión empleada para encontrar las soluciones numéricas.

Otra fuente de este tipo de errores tiene su origen en la imprecisión de los datos físicos: constantes físicas y datos empíricos.

En el caso de errores en la medida de los datos empíricos y teniendo en cuenta su carácter generalmente aleatorio, su tratamiento analítico es especialmente complejo pero imprescindible para contrastar el resultado obtenido computacionalmente (Wikipedia, 2016)

La línea piezométrica

Es la suma de las alturas de presión y de posición, y se determina uniendo los puntos que alcanzaría el fluido circulante en distintos piezómetros conectados a lo largo de la tubería.

Normalmente, se supone que el montante energético en un punto de la conducción viene dado por la línea de alturas piezométricas. Esto se justifica por ser las velocidades normales en una conducción las comprendidas entre 0.5 y 2.5 m/s, que elevadas al cuadrado y divididas por $2g$ supone entre 0.01 y 0.3 metros de columna de agua, frente a la presión de decenas de metros que acostumbran a tener las redes. Además, los levantamientos topográficos no suelen tener una precisión superior los ± 0.5 m. Por todo ello y como regla general, los pocos centímetros de la energía cinética son del todo despreciables, quedando las líneas de energía como se indica en la siguiente figura.

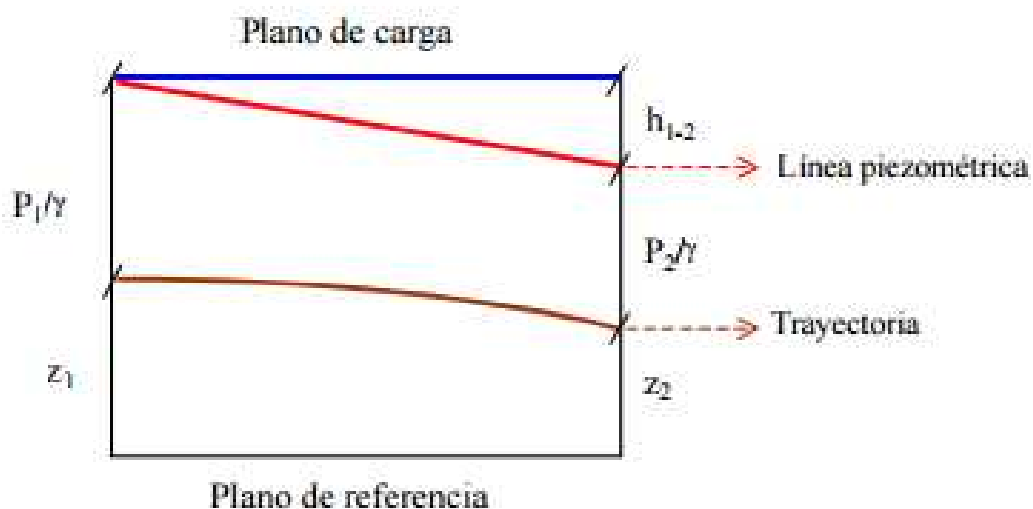


Imagen4 Situación energética (Ingeniería Rural, 2011)

En este caso, el plano de carga coincide con la línea de presiones estáticas, que es la línea que une las presiones a lo largo de la tubería cuando el fluido no está en movimiento. (Ingeniería Rural, 2011)

2.3 MARCO CONCEPTUAL

Sección transversal.- En geometría descriptiva, la sección de un sólido es la intersección de un plano con dicho sólido. La sección transversal es cuando el plano α es perpendicular al eje del sólido. Siendo de gran utilidad en las representaciones gráficas de elementos arquitectónicos y de ingeniería. Formando parte, casi imprescindible, de los planos de todo proyecto técnico. (Wikipedia, 2016)

Modelación matemática.- La aplicación de la modelación matemática consiste en el reemplazo del objeto cognitivo por su imagen matemática (modelo matemático) la cual, implementada en algoritmos lógico – numéricos en un ordenador, permite estudiar las cualidades del proceso original.

Este método de cognición conjuga las ventajas de la teoría y del experimento. Al trabajar con el modelo matemático y no con el objeto cognitivo, en forma relativamente rápida y a bajos costos, se pueden estudiar y pronosticar sus propiedades de estado (ventaja teórica) (Modelación Matemática - Una Introducción al método)

Emulación.- Un software que permite ejecutar programas de ordenador en una plataforma diferente de la cual fueron escritos originalmente (Wikipedia, 2016).

Acueducto.- es un sistema o conjunto de sistemas de irrigación que permite transportar agua en forma de flujo continuo desde un lugar en el que está accesible en la naturaleza hasta un punto de consumo distante, generalmente una ciudad o poblado (Wikipedia, 2016).

Mecánica de fluidos.- Es la rama de la física comprendida dentro de la mecánica de medios continuos que estudia el movimiento de los fluidos (gases y líquidos) así como las fuerzas que lo provocan (Mott, 2006).

Hidrostática.- Es la rama de la hidráulica que estudia los líquidos y gases incompresibles en estado de equilibrio (Wikipedia, 2016).

Combinación adimensional.- Las magnitudes adimensionales están involucrados particularmente en la mecánica de fluidos y en la descripción de fenómenos de transporte, moleculares y convectivos, ya que utilizan la similitud de modelos reducidos o teoría de las maquetas y construye la interpretación de los resultados de ensayos. (Wikipedia, 2016).

Dinámica de fluidos. - En física, es una sub-disciplina de la mecánica de fluidos que se ocupa de flujo de fluido, la ciencia natural de los fluidos (líquidos y gases) en movimiento. Cuenta con diversas sub-disciplinas sí mismo, incluyendo la aerodinámica (el estudio del aire y otros gases en movimiento) y la hidrodinámica (el estudio de los líquidos en movimiento) (Enciclopedia Libre Universal en Español, 2012).

Viscosidad. - Es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción. La viscosidad se corresponde con el concepto informal de "espesor". Por ejemplo, la miel tiene una viscosidad mucho mayor que el agua. (Symon, 1971).

Cinemática. - Es una rama de la física dedicada al estudio del movimiento de los cuerpos en el espacio, sin atender a las causas que lo producen (lo que llamamos fuerzas). Por tanto la cinemática sólo estudia el movimiento en sí, a diferencia de la dinámica que estudia las interacciones que lo producen. (Robert Resnick, 2004).

Flujo Laminar y Turbulento. - El flujo laminar es típico de fluidos a velocidades bajas o viscosidades altas, mientras fluidos de viscosidad baja, velocidad alta o grandes caudales suelen ser turbulentos. El número de Reynolds es un parámetro adimensional importante en las ecuaciones que describen en qué condiciones el flujo será laminar o turbulento (Avila, K.; D. Moxey, A. de Lozar, M. Avila, D. Barkley, B. Hof , 2011).

Iteración. - Significa el acto de repetir un proceso con la intención de alcanzar una meta deseada, objetivo o resultado. Cada repetición del proceso también se le denomina una "iteración", y los resultados de una iteración se utilizan como punto de partida para la siguiente iteración (Wikipedia, 2016).

3. DIAGNÓSTICO DE LAS CONDICIONES DEL ACUEDUCTO

3.1 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Antes de proceder con la aplicación del modelo matemático se debe definir el sistema en el que se hará el análisis; el acueducto no es una tubería recta viéndolo completamente desde su inicio hasta su fin, ya que, descansa sobre la topografía del terreno; esto se puede evidenciar con las diferentes alturas que se presentan en su trayecto, por otro lado, no se puede negar que está hecha de tuberías rectas y que en cierto punto serán consideradas tuberías rectas con algún grado de inclinación.



Imagen5 Tuberías rectas que forman el acueducto, (Gamboa&Asociados)

El sistema se definirá como una de estas tuberías, ya que tendremos secciones que se repetirán una y otra vez, pero con diferencias como la altura, que deben ser calculadas a medida que se avanza en la iteración de las ecuaciones, por lo que se procederá también a utilizar un programa que ayude en la tarea.

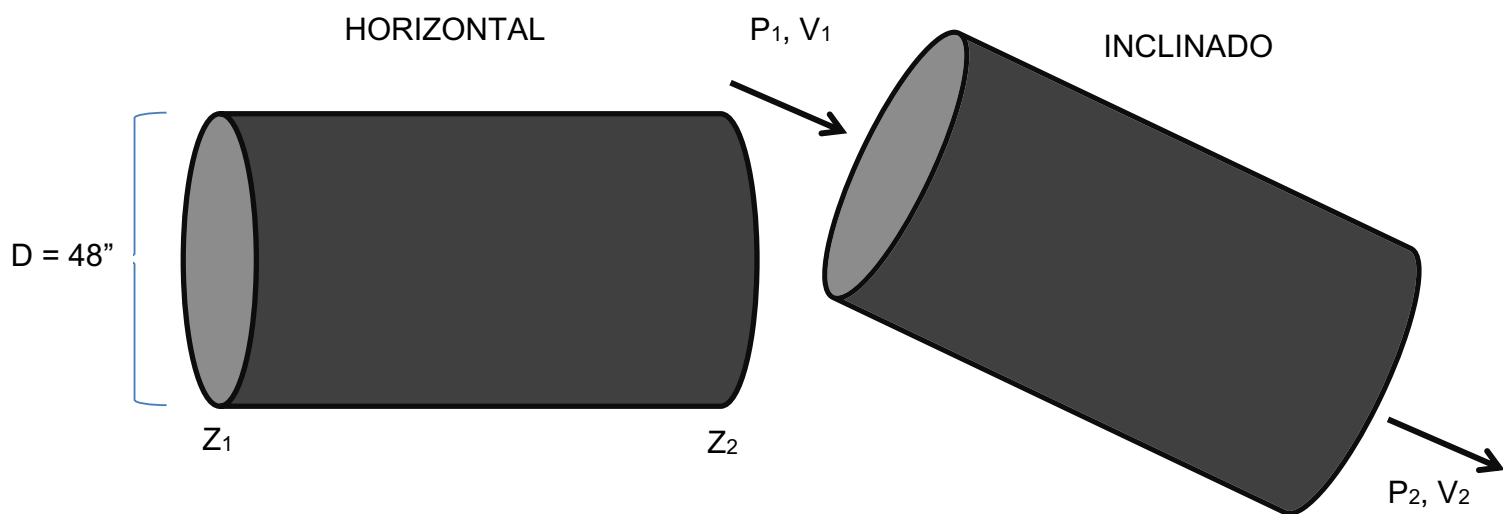


Imagen6 Posibles planos del acueducto (Derecho de autoría del investigador)

Se tiene como información que la tubería es de acero API 5LX60, cada una de 12 metros de longitud con un peso de 4 toneladas.

Con respecto a la ecuación de la continuidad, se puede definir la velocidad del fluido dentro de la tubería, claro que esta sería una velocidad media ya que en las paredes de la tubería disminuiría la velocidad, y, mientras se aleje de las paredes esta aumentaría.

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot V_2$$

Como es agua en régimen permanente tendríamos:

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Como las áreas de la tubería no cambiaran, en este caso $A_1 = A_2$, la velocidad del fluido no cambiará, dado esto, se establece que mientras el caudal no cambie, la velocidad se mantendrá constante. El caudal se mantendrá constante hasta que se produzcan derivaciones donde el caudal principal disminuirá.

$$Q = A \bar{v}$$

El caudal que se tendrá en la entrada del acueducto será 5.500 m³/hora, definiéndolo como Q₁, también se lo podría definir como caudal total; pero, para una mejor apreciación al sistema, se lo definirá de esta manera. Como se puede notar en la figura, hay 3 puntos de derivaciones; estos entregarán cierta cantidad de caudal, y se los denominará como el caudal Q_d, por lo que, el caudal irá disminuyendo acorde vaya llegando hacia el aramo.

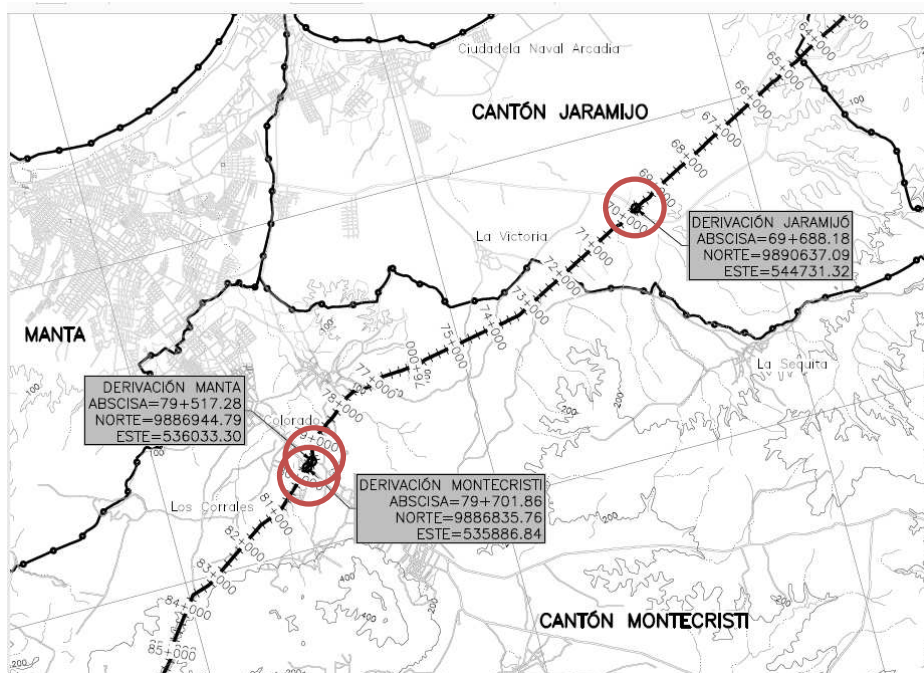


Imagen7 Posición de las derivaciones del acueducto (Derecho de autoría del investigador)
 Al kilómetro 69 con 688,18 metros, se tiene la primera derivación hacia Jaramijó, esta entregará 300 m³/hora; como en total se tiene 5500 m³/hora tendremos:

$$Q_1 = Q_d + Q_2$$

$$5500 \text{ m}^3/\text{h} = 300 \text{ m}^3/\text{h} + Q_2$$

$$Q_2 = (5500 - 300) \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_2 = 5200 \text{ m}^3/\text{h}$$

A partir del kilómetro 69 con 688,18 metros; el caudal total de la tubería será de $5200 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta la nueva derivación, que será en el kilómetro 79 con 577.28 metros hacia Manta, en la que se entregará $1.250 \text{ m}^3/\text{h}$

$$Q_2 = Q_d + Q_3$$
$$5200 \text{ m}^3/\text{h} = 1250 \text{ m}^3/\text{h} + Q_3$$
$$Q_3 = (5200 - 1250) \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_3 = 3950 \text{ m}^3/\text{h}$$

A partir del kilómetro 79 con 577,28 metros; el caudal total de la tubería será de $3950 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta la nueva derivación, que será en el kilómetro 79 con 701.86 metros hacia Montecristi, en la que se entregará $450 \text{ m}^3/\text{h}$

$$Q_3 = Q_d + Q_4$$
$$3950 \text{ m}^3/\text{h} = 450 \text{ m}^3/\text{h} + Q_4$$
$$Q_4 = (3950 - 450) \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_4 = 3500 \text{ m}^3/\text{h}$$

Al final del acueducto, después de las derivaciones se tendrá una salida de $3500 \text{ m}^3/\text{h}$, por lo tanto, en la tubería se desarrollaran 4 velocidades medias pertenecientes a la disminución del caudal producido por las derivaciones.

Ya que el diámetro de la tubería es 48" y su espesor esta entre 1/2" y 3/8" hay que hacer la respectiva conversión de unidades y deducción del diámetro interno del acueducto.

Datos

$D_{ext} = 48''$

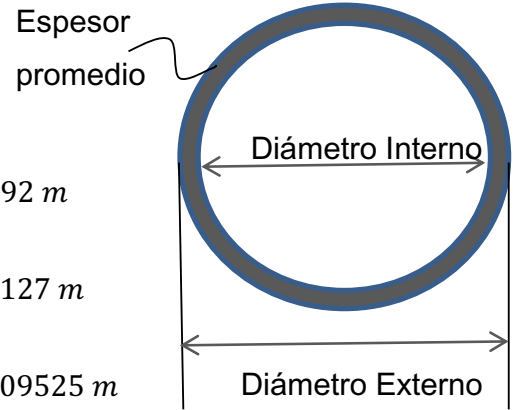
$$48'' \times \frac{0.0254 \text{ metros}}{1''} = 1.2192 \text{ m}$$

Espesor (E) = 1/2" – 3/8"

$$1/2'' \times \frac{0.0254 \text{ metros}}{1''} = 0.0127 \text{ m}$$

$D_{int} = ?$

$$3/8'' \times \frac{0.0254 \text{ metros}}{1''} = 0.009525 \text{ m}$$



$$E_{prom} = \frac{(0.0127 + 0.009525)}{2} \text{ metros} = 0.0111125 \text{ m}$$

$$D_{int} = D_{ext} - 2E_{prom}$$

$$D_{int} = [1.2192 - 2(0.0111125)] \text{ m}$$

$$D_{int} = (1.2192 - 0.022225) \text{ m}$$

$$D_{int} = 1.196975 \text{ m}$$

Definidos los caudales y el diámetro, es posible encontrar las velocidades medias de la siguiente manera:

$$Q = A \cdot \bar{v}$$

$$\bar{v} = Q/A$$

En donde $A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(1.196975)^2}{4} \text{ m}^2 = 1.171714254 \text{ m}^2$

$$\bar{v} = \frac{Q}{1.125278552 \text{ m}^2}$$

Aplicando esta fórmula a todos los caudales calculados se tiene:

Kilómetros	Variable	Caudal (m^3/h)
0 a 69.688	Q ₁	5500
69.688 a 79.517	Q ₂	5200
79.517 a 79.701	Q ₃	3950
79.701 a 93	Q ₄	3500

$$\bar{v}_1 = \frac{Q_1}{1.125278552 \text{ m}^2} = \frac{5500 \text{ m}^3/h}{1.125278552 \text{ m}^2} = 4887,678693 \text{ m/h}$$

$$\bar{v}_2 = \frac{Q_2}{1.125278552 \text{ m}^2} = \frac{5200 \text{ m}^3/h}{1.125278552 \text{ m}^2} = 4621,078037 \text{ m/h}$$

$$\bar{v}_3 = \frac{Q_3}{1.125278552 \text{ m}^2} = \frac{3950 \text{ m}^3/h}{1.125278552 \text{ m}^2} = 3510,24197 \text{ m/h}$$

$$\bar{v}_4 = \frac{Q_4}{1.125278552 \text{ m}^2} = \frac{3500 \text{ m}^3/h}{1.125278552 \text{ m}^2} = 3110,340987 \text{ m/h}$$

Kilómetros	Variable	Velocidad (m/h)
0 a 69.688	\bar{v}_1	4887,678693
69.688 a 79.517	\bar{v}_2	4621,078037
79.517 a 79.701	\bar{v}_3	3510,24197
79.701 a 93	\bar{v}_4	3110,340987

3.2 RÉGIMEN DEL SISTEMA

Ahora que se tiene las velocidades medias del flujo, se puede determinar si el régimen es turbulento o laminar en todos los puntos; partiendo de si el número de Reynolds calculado es mayor a 10000, en cuyo caso se lo considerara turbulento y laminar o de transición en caso contrario.

Datos

$$v_{H_2O@28^\circ C} = 0,841 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (anexo 1)} \quad Re = \frac{\bar{v}_s D}{\nu}$$

$$D = 1.196975 \text{ metros} \quad Re = \frac{\bar{v}_s (1.196975 \text{ m})}{0.841 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\bar{v}_s = \text{Velocidad en la sección} \quad Re = \frac{\bar{v}_s (14232.862)}{1 \text{ m/s}}$$

Para aplicar esta fórmula, se debe hacer la conversión de la velocidad a m/s; por lo tanto, se tendrá:

$$\bar{v}_1 = 4887,678693 \frac{\text{m}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1,357688526 \text{ m/s}$$

$$\bar{v}_2 = 4621,078037 \frac{\text{m}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1,283632788 \text{ m/s}$$

$$\bar{v}_3 = 3510,24197 \frac{\text{m}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0,975067214 \text{ m/s}$$

$$\bar{v}_4 = 3110,340987 \frac{\text{m}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 0,863983607 \text{ m/s}$$

$$Re_1 = \frac{\bar{v}_1(14232.862)}{1 \text{ m/s}} = \frac{1,357688526 \text{ m/s}(14232.862)}{1 \text{ m/s}}$$

$$Re_1 = 1932365,307 \text{ Turbulento}$$

$$Re_2 = \frac{\bar{v}_2(14232.862)}{1 \text{ m/s}} = \frac{1,283632788 \text{ m/s}(14232.862)}{1 \text{ m/s}}$$

$$Re_2 = 1826963,563 \text{ Turbulento}$$

$$Re_3 = \frac{\bar{v}_3(14232.862)}{1 \text{ m/s}} = \frac{0,975067214 \text{ m/s}(14232.862)}{1 \text{ m/s}}$$

$$Re_3 = 1387789,63 \text{ Turbulento}$$

$$Re_4 = \frac{\bar{v}_4(14232.862)}{1 \text{ m/s}} = \frac{0,863983607 \text{ m/s}(14232.862)}{1 \text{ m/s}}$$

$$Re_4 = 1229687,014 \text{ Turbulento}$$

Evaluando los valores del número de Reynolds en todos los casos, estos sobrepasan el valor de 10000; por lo que, se puede estar netamente seguro de que el flujo será turbulento completamente desarrollado.

4. PROPUESTA DE MODELACIÓN MATEMÁTICA Y EMULACIÓN DEL ACUEDUCTO

4.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA

En cuanto a la ecuación de la conservación de la energía se tendrá:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + gH_p$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + gz_2 - gz_1 + gH_p$$

Ya que la velocidad será la misma, tanto en la entrada como en la salida del tramo que analizaremos, nos quedaría:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + gz_2 - gz_1 + gH_p$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = gz_2 - gz_1 + gH_p$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = z_2 - z_1 + H_p$$

La expresión matemática $\frac{p_1 - p_2}{\rho g}$ representará la caída o aumento de presión a lo largo de la tubería debida a la diferencia de alturas y las pérdidas por fricción.

Los valores de Z_1 y Z_2 son las alturas topográficas entre las abscisas que cortan el tramo que se analizará.

El valor de H_p representa el valor de la pérdida de energía debida a la fricción que se produce en las paredes de la tubería con el agua a lo largo del tramo.

La diferencia $p_1 - p_2$ puede considerarse como ΔP , en ese caso la ecuación de conservación de energía quedaría:

$$\Delta P = (z_2 - z_1 + H_p)\rho g$$

El valor de la densidad (ρ) por ser considerado estable, se puede determinar como 1.000 kg/m^3 ; así mismo, la gravedad (g) como 9.807 m/s^2 nos quedaría:

$$\Delta P = (1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(z_2 - z_1 + H_p)$$

$$\Delta P = 9807(z_2 - z_1 + H_p) \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

El Valor de H_p estará determinado por la siguiente formula

$$H_p = h + h_v$$

El valor de h representa a la perdida de carga debido a la longitud de la tubería y h_v a la perdida de carga debida a los accesorios

$$h = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

En la cual, podemos substituir el diámetro (D), ya que la sección se mantendrá constante por ser la misma tubería, sin expansiones ni reducciones; así mismo, el valor de la gravedad (g) nos quedaría:

$$h = f \frac{L}{1.196975 \text{m}} \frac{V^2}{2(9.807 \text{m/s}^2)}$$

$$h = f \frac{LV^2}{27.47746 \text{ m}^2/\text{s}^2}$$

El factor de fricción (f) debe ser determinado con respecto al régimen que se tenga, en todos los casos, el régimen es turbulento en donde $Re > 10000$, por lo tanto, podemos recurrir al diagrama de Moody, en donde se menciona la rugosidad para aceros comerciales de $\varepsilon = 0.09 \text{ mm}$ (Anexo 2).

$$f = \frac{0.25}{\left[\text{Log} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Dado que la rugosidad (ε) es del material y la tubería no cambiara su diámetro (D) reemplazamos

$$f = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(\frac{0.09 \text{ mm}}{3.7(1196.75 \text{ mm})} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.000020325 + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) \right]^2}$$

Dado que se desarrollaran 4 velocidades diferentes también tendremos 4 números de Reynolds diferentes. Ya que el factor de fricción es dependiente del número de Reynolds se procede al cálculo.

Kilómetros	Variable	Reynolds
0 a 69.688	Re_1	1932365,307
69.688 a 79.517	Re_2	1826963,563
79.517 a 79.701	Re_3	1387789,63
79.701 a 93	Re_4	1229687,014

$$f_1 = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.00000609 + \frac{5.74}{Re_1^{0.9}}\right) \right]^2} = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.00000609 + \frac{5.74}{(1932365,307)^{0.9}}\right) \right]^2}$$

$$f_1 = 0,011600788$$

$$f_2 = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.00000609 + \frac{5.74}{Re_2^{0.9}}\right) \right]^2} = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.00000609 + \frac{5.74}{(1826963,563)^{0.9}}\right) \right]^2}$$

$$f_2 = 0,011662438$$

$$f_3 = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.00000609 + \frac{5.74}{Re_3^{0.9}}\right) \right]^2} = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.00000609 + \frac{5.74}{(1387789,63)^{0.9}}\right) \right]^2}$$

$$f_3 = 0,011992269$$

$$f_4 = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.00000609 + \frac{5.74}{Re_4^{0.9}}\right) \right]^2} = \frac{0.25}{\left[\text{Log}\left(0.00000609 + \frac{5.74}{(1229687,014)^{0.9}}\right) \right]^2}$$

$$f_4 = 0,01215248$$

Teniendo los factores de fricción calculados, se puede obtener la caída de presión en cada punto con las expresiones matemáticas siguientes:

Kilómetros	Gradiente	Ecuación
0 a 69.688	ΔP	$9807(z_2 - z_1 + 0,011600788 \frac{(1,357688526)^2 L}{27.47746} + h_v) \frac{N}{m^3}$
69.688 a 79.517	ΔP	$9807(z_2 - z_1 + 0,011662438 \frac{(1,283632788)^2 L}{27.47746} + h_v) \frac{N}{m^3}$
79.517 a 79.701	ΔP	$9807(z_2 - z_1 + 0,011992269 \frac{(0,975067214)^2 L}{27.47746} + h_v) \frac{N}{m^3}$
79.701 a 93	ΔP	$9807(z_2 - z_1 + 0,01215248 \frac{(0,863983607)^2 L}{27.47746} + h_v) \frac{N}{m^3}$

En donde Z_2 y Z_1 representaran la diferencia de altura entre dos puntos y L la abscisa entre esos dos puntos. Estas variables la encontraremos en la medición del acueducto:

`=9807*(F3-F2+((SQS3*POTENCIA(P3;2)*(C3-C2))/27,47746)+G3)`

B	C	D	E	F	G	H
EXCAVACION DE LA ZANJA	ABSCISA	COTA TERRENO ORIGINAL	COTA TERRENO	Zx	h _v	deltaP
2,48	0,2	68,66	66,18	0	1,5264317	
2,5	3,08	68,68	66,18	0	=9807*(F3-F2+((SQS3*POTENCIA(\$P\$3;2)*(C3-C2))/27,47746)+G3)	
2,51	5,17	68,69	66,18	0	15,9512112	
2,93	16,19	68,7	65,77	0	-3936,7636	
3,29	27,71	68,67	65,38	0	-3736,8075	
2,49	445,89	28,98	26,49	0	1367,41176	
2,5	457,82	29,14	26,64	0	1562,10165	
2,59	469,84	29,35	26,76	0	1268,57855	
2,46	481,33	29,31	26,85	0	970,323501	
2,57	492,59	29,52	26,95	0	1066,6381	
2,63	504,7	29,54	26,91	0	-299,85456	
2,6	516,32	29,5	26,9	0	-9,3843183	
2,47	528,38	29,5	27,03	0	1366,95383	

Imagen 8 Mediciones topográficas del acueducto (Derecho de autoría del investigador)

Dado que las medidas de Z_2 y Z_1 son medidas de altura y L de longitud, ambas se sumaran en la ecuación y tendremos una medida de longitud en metros, por lo tanto, la magnitud del gradiente de presión (ΔP) estará en N/m^2 .

En cuanto a las pérdidas localizadas o de accesorios:

$$h_v = \sum K \frac{V^2}{2g}$$

Hay que localizar en que punto de la tubería se encuentran las válvulas, ya que si en cualquier tramo del acueducto no hay un accesorio este tendrá valor 0, caso contrario dependerá de las características del accesorio.

En el acueducto se encontraran 218 válvulas de aire, las cuales acercan al acueducto a un modelo ideal al poder tener el acueducto sin aire mientras se inicia el proceso.

Aunque estas aumentan la eficiencia de las bombas por no tener aire en flujo contrario, aumentan la carga debida a la fricción causada por el accesorio en cada punto con salida en T lateral para la purga del aire.

UBICACIÓN PARA VÁLVULAS DE AIRE COMBINADAS EN ACUEDUCTO (VER NOTA 5)										
#	TAG	Abscisa del Eje Tubo	Diametro Válvula / Línea	Clase ASME	Modelo	Especificación de Línea	Longitud de Tubería (metros)	Norte	Este	DISTANCIA
191	AVRV-6-AC-191	Km0+546,60	6	600	D-016	RA44	Sobre Tubería Aérea	9901814,57	602518,61	
1	AVRV-4-AC-001	Km0+616,75	4	600	D-016	RA44	3,21	9901790,63	602453,61	70,15
2	AVRV-6-AC-002	Km0+737,33	6	600	D-016	RA44	2,42	9901822,55	602338,08	120,58
3	AVRV-6-AC-003	Km1+149,61	6	600	D-016	RA44	2,75	9901942,55	601943,73	412,28
208	AVRV-6-AC-208	Km1+593,43	6	600	D-016	RA44	2,99	9902101,64	601533,31	443,82
4	AVRV-6-AC-004	Km1+873,80	6	600	D-016	RA44	2,86	9902303,22	601338,99	280,37
5	AVRV-6-AC-005	Km2+486,28	6	600	D-016	RA44	3,23	9902767,82	600940,97	612,48

Imagen9 Ubicación de las válvulas (Derecho de autoría del investigador)

Ya que los valores de gravedad son constantes, se puede reemplazar el valor de K , y que, al tener formaciones en T, se puede asumir un valor K de 1.8 (Anexo 3)

$$h_v = 1.8 \frac{V^2}{2(9.8 \text{ m/s}^2)}$$

El transporte de agua cruda se efectúa utilizando controles de flujo en las derivaciones a través de válvulas de control electrohidráulicas, con el propósito de garantizar el caudal de agua cruda demandado.

En caso de falla eléctrica local, la válvula de control permanecerá en su última posición, pero, en caso de una falla eléctrica en la estación de bombeo principal, las válvulas de control de las tres derivaciones se cerrarán completamente.

En la salida hacia la Refinería del Pacífico, no se cuenta con una válvula de control. Tiene una válvula de compuerta de 48", un medidor de flujo de 48" y una brida terminal en el límite de batería. Una vez se conozca el punto final de entrega a la refinería, la derivación RDP será completada, sin embargo, no es parte del alcance de este proyecto.

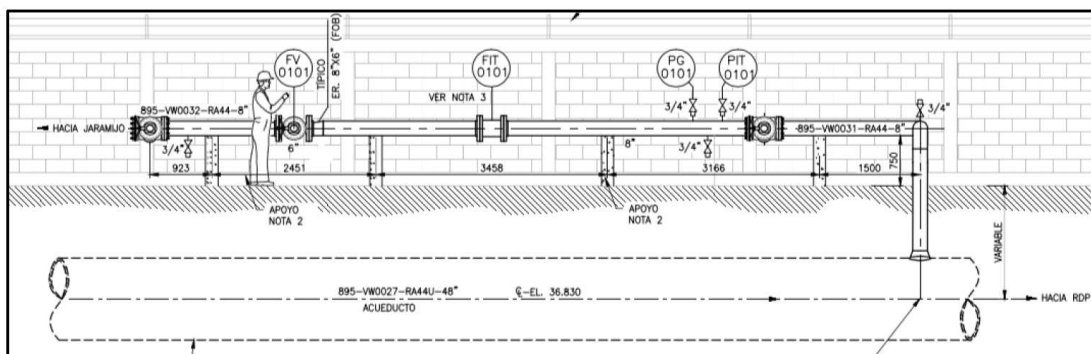


Imagen10 Arreglo Típico de tuberías en las derivaciones (Refinería Del Pacifico)

En el caso de las válvulas cónicas pueden ser considerada una pérdida producida por una válvula de compuerta, por lo que tendríamos un $k = 24$ (Anexo 3)

En las ubicaciones donde se encuentren las válvulas cónicas se produciría una pérdida equivalente a:

$$h_v = 24 \frac{V^2}{2(9.8 \text{ m/s}^2)}$$

Los valores de h_v estarán en magnitud de metros, sumando este monomio a nuestras ecuaciones se tiene:

Kilómetros	Ecuación
0 a 69.688	$9807 \left[z_2 - z_1 + 0,011600788 \frac{(1,357688526)^2 L}{27.47746} + k \frac{(1,357688526)^2}{19.6} \right] \frac{N}{m^3}$
69.688 a 79.517	$9807 \left[z_2 - z_1 + 0,011662438 \frac{(1,283632788)^2 L}{27.47746} + k \frac{(1,283632788)^2}{19.6} \right] \frac{N}{m^3}$
79.517 a 79.701	$9807 \left[(z_2 - z_1 + 0,011992269 \frac{(0,975067214)^2 L}{27.47746}) + k \frac{(0,975067214)^2}{19.6} \right] \frac{N}{m^3}$
79.701 a 93	$9807 \left[z_2 - z_1 + 0,01215248 \frac{(0,863983607)^2 L}{27.47746} + k \frac{(0,863983607)^2}{19.6} \right] \frac{N}{m^3}$

Los valores resultantes de cada ecuación representan a ΔP .

Asumiendo que la presión de bombeo será de 47.5 kg/cm², se procede a la conversión

$$47.5 \frac{kgf}{cm^2} \times \frac{9.8 N}{1 kg} \times \frac{10000 cm^2}{1 m^2} = 4655000 \frac{N}{m^2}$$

Para tener un valor de referencia y ver cómo va variando la presión, despejamos la variable de presión (P_2) del valor de ΔP considerando que $P_1 = 4655000$ como valor inicial tendríamos:

$$\Delta P = p_1 - p_2$$

$$p_2 = p_1 - \Delta P$$

$$p_2 = (4655000 - 1,526431698) \frac{N}{m^2}$$

$$p_2 = 4654998,474 \frac{N}{m^2}$$

Este valor será la presión para la abscisa de 0.2 metros y esta presión será P_1 para el siguiente cálculo para la abscisa de 3.08 metros usando la ecuación de $p_2 = p_1 - \Delta P$, por lo que se podría describir como un proceso iterativo en donde:

$$p_{x+1} = p_x - \Delta P$$

ZANJA	ABSCISA	COTA TERRENO ORIGINAL	COTA TERRENO	Zx	hv	deltaP	Px
2,48	0,2	68,66		66,18	0	1,5264317	4654998,474
2,5	3,08	68,68		66,18	0	21,9806165	=+I2-H3
2,51	5,17	68,69		66,18	0	15,9512112	4654960,542
2,93	16,19	68,7		65,77	0	-3936,7636	4658897,305
3,29	27,71	68,67		65,38	0	-3736,8075	4662634,113
3,3	33,03	68,68		65,38	0	40,6030832	4662593,51
3,35	37,19	68,73		65,38	0	31,7497793	4662561,76
3,24	49,3	68,62		65,38	0	92,4254393	4662469,335
3,12	58,72	68,5		65,38	0	71,894933	4662397,44
3,05	61,48	68,01		64,96	0	-4097,8752	4666495,315
3,17	72,08	64,76		61,59	0	-32968,689	4699464,004
3,78	78	63,39		59,61	0	-19372,678	4718836,682
4,91	81,15	63,47		58,56	0	-10273,309	4729109,99
5,29	84,75	63,47		58,18	0	-3699,1842	4732809,175

Image11 Mediciones topográficas del acueducto (Derecho de autoría del investigador)

A la entrada de del acueducto se empezó con una presión de $4655000 \frac{N}{m^2}$ y al final del acueducto, como se puede ver en la gráfica, la presión disminuyó hasta $1632694,517 \frac{N}{m^2}$

Viéndolo de una manera general, se puede determinar un ΔP_G del acueducto, por lo que se tendrá:

$$\Delta P_G = p_1 - p_2$$

$$\Delta P_G = (4655000 - 1632694,517) \frac{N}{m^2}$$

$$\Delta P_G = 3022305,483 \frac{N}{m^2}$$

Si al final del acueducto se quiere que la descarga de agua sea a presión atmosférica; que es equivalente a $101325 \frac{N}{m^2}$, esta asumirá el valor de p_{ideal2} . Si este se asume como presión final del acueducto, se podrá calcular la presión inicial ideal en este escenario de la siguiente manera:

$$\Delta P_G = p_{ideal1} - p_{ideal2}$$

$$p_{ideal1} = \Delta P_G + p_{ideal2}$$

$$p_{ideal1} = (3022305,483 + 101325) \frac{N}{m^2}$$

$$p_{ideal1} = 3123630,483 \frac{N}{m^2}$$

Obteniendo la presión inicial ideal, para obtener una presión final ideal atmosférica, se puede obtener la siguiente caída de presión y cálculos en cada punto de la tubería:

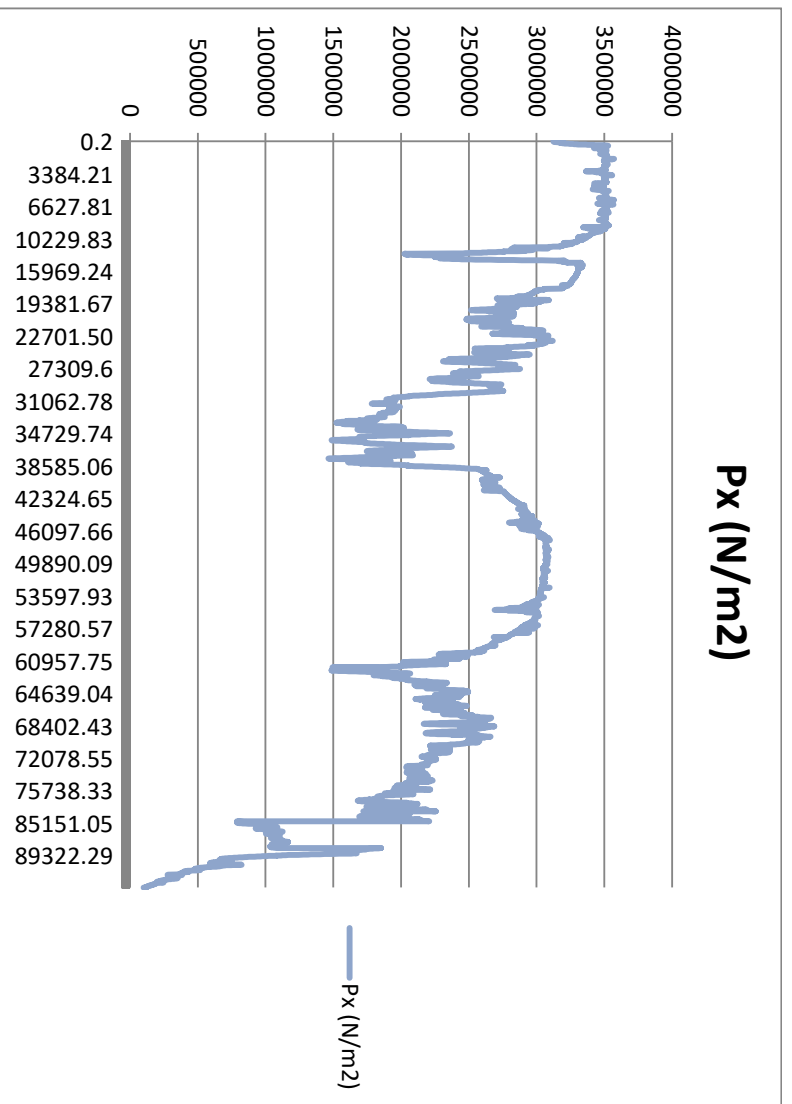


Imagen 12 Caída de presión a lo largo del acueducto (Derecho de autoría del investigador)

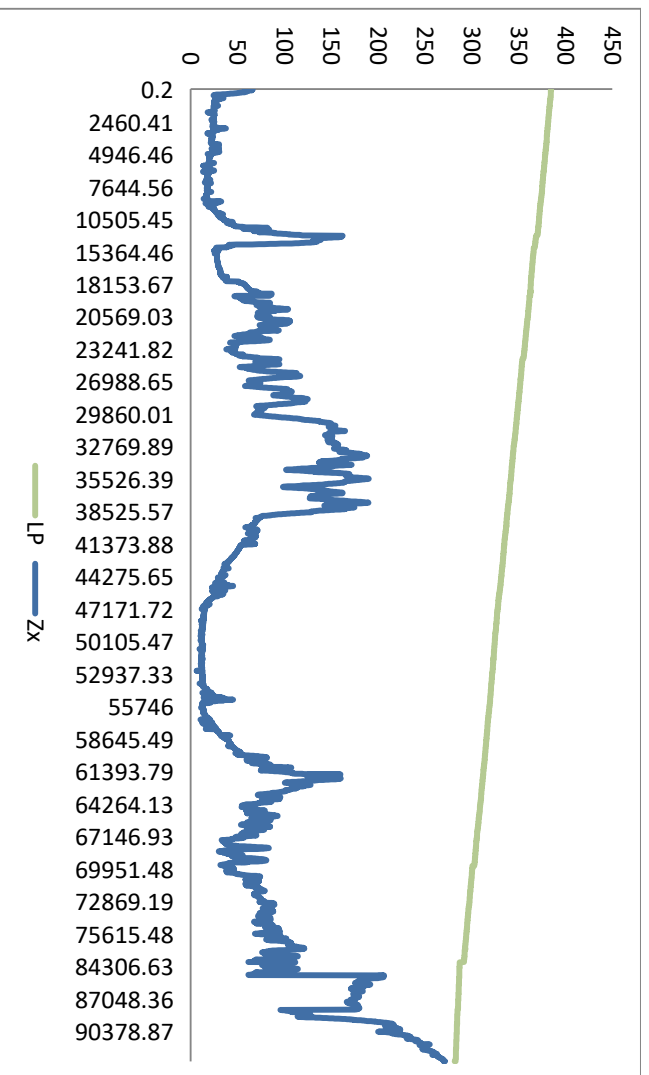


Imagen 13 Línea piezométrica (Derecho de autoría del investigador)

4.2 POSIBLES ESCENARIOS

Para hallar los posibles escenarios, se puede usar una tabla de la verdad en donde las posibles combinaciones estarán dadas por:

$$N_c = 2^n$$

Ya que se tiene 3 derivaciones y una salida en total, tendríamos 3 variables; las cuales pueden estar habilitadas o no, por lo tanto, nuestro valor de n será de 3:

	$N_c = 2^3$	$N_c = 8$	
Escenario	Qd1	Qd2	Qd3
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	0
4	0	1	1
5	1	0	0
6	1	0	1
7	1	1	0
8	1	1	1

Esta tabla ayuda a apreciar de una mejor forma el caudal necesario en todos los posibles escenarios dado que se puede reemplazar los valores positivos por los del caudal y sumar para obtener un total para el sistema.

Los caudales de variables se pueden obtener de los antecedentes, en donde se tiene que la primera derivación entregara $300 \text{ m}^3 / \text{h}$, la segunda $1250 \text{ m}^3 / \text{h}$ y tercera $450 \text{ m}^3 / \text{h}$.

Al final del acueducto se tendrá una necesidad de caudal de $3500 \text{ m}^3 / \text{h}$, lo que generara la siguiente tabla:

Escenario	Qd1	Qd2	Qd3	Q4	Total
1	0	0	0	3500	3500
2	0	0	450	3500	3950
3	0	1250	0	3500	4750
4	0	1250	450	3500	5200
5	300	0	0	3500	3800
6	300	0	450	3500	4250
7	300	1250	0	3500	5050
8	300	1250	450	3500	5500

El escenario 8 tiene un caudal total de $5500 \text{ m}^3 / \text{h}$, el cuál es el perteneciente al primer análisis hecho ya que todas las derivaciones están activas. Por lo tanto, el escenario 8, el cual demanda más caudal, ya ha sido analizado, por lo que se tendrá 7 escenarios sin datos de variables, ni posibles presiones. Realizando el mismo procedimiento para los otros escenarios las variables de velocidad, Reynolds y factor de fricción, para cada uno de los escenarios fueron:

Escenario 1

Kilómetros	Caudal (m^3/h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	3500	3110,34099	0,86398361	1229687	0,0121525
69.688 a 79.517	3500	3110,34099	0,86398361	1229687	0,0121525
79.517 a 79.701	3500	3110,34099	0,86398361	1229687	0,0121525
79.701 a 93	3500	3110,34099	0,86398361	1229687	0,0121525

Escenario 2

Kilómetros	Caudal (m^3/h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	3950	3510,242	0,9750672	1387789,6	0,0119923
69.688 a 79.517	3950	3510,242	0,9750672	1387789,6	0,0119923
79.517 a 79.701	3950	3510,242	0,9750672	1387789,6	0,0119923
79.701 a 93	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525

Escenario 3

Kilómetros	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	4750	4221,1771	1,1725492	1668860,9	0,0117659
69.688 a 79.517	4750	4221,1771	1,1725492	1668860,9	0,0117659
79.517 a 79.701	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525
79.701 a 93	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525

Escenario 4

Kilómetros	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	5200	4621,078	1,2836328	1826963,6	0,0116624
69.688 a 79.517	5200	4621,078	1,2836328	1826963,6	0,0116624
79.517 a 79.701	3950	3510,242	0,9750672	1387789,6	0,0119923
79.701 a 93	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525

Escenario 5

Kilómetros	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	3800	3376,9416	0,9380393	1335088,8	0,0120425
69.688 a 79.517	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525
79.517 a 79.701	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525
79.701 a 93	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525

Escenario 6

Kilómetros	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	4250	3776,8426	1,049123	1493191,4	0,0118999
69.688 a 79.517	3950	3510,242	0,9750672	1387789,6	0,0119923
79.517 a 79.701	3950	3510,242	0,9750672	1387789,6	0,0119923
79.701 a 93	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525

Escenario 7

Kilómetros	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	5050	4487,7777	1,2466049	1774262,7	0,0116954
69.688 a 79.517	4750	4221,1771	1,1725492	1668860,9	0,0117659
79.517 a 79.701	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525
79.701 a 93	3500	3110,341	0,8639836	1229687	0,0121525

Escenario 8

Kilómetros	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	5500	4887,6787	1,3576885	1932365,31	0,0116008
69.688 a 79.517	5200	4621,078	1,2836328	1826963,56	0,0116624
79.517 a 79.701	3950	3510,242	0,9750672	1387789,63	0,0119923
79.701 a 93	3500	3110,341	0,8639836	1229687,01	0,0121525

4.3 ERROR RELATIVO

En el mes de noviembre del presente año se pudo obtener información acerca de la presión necesaria para tener un caudal de 6000 m³/h, ya que se hicieron pruebas de funcionalidad.

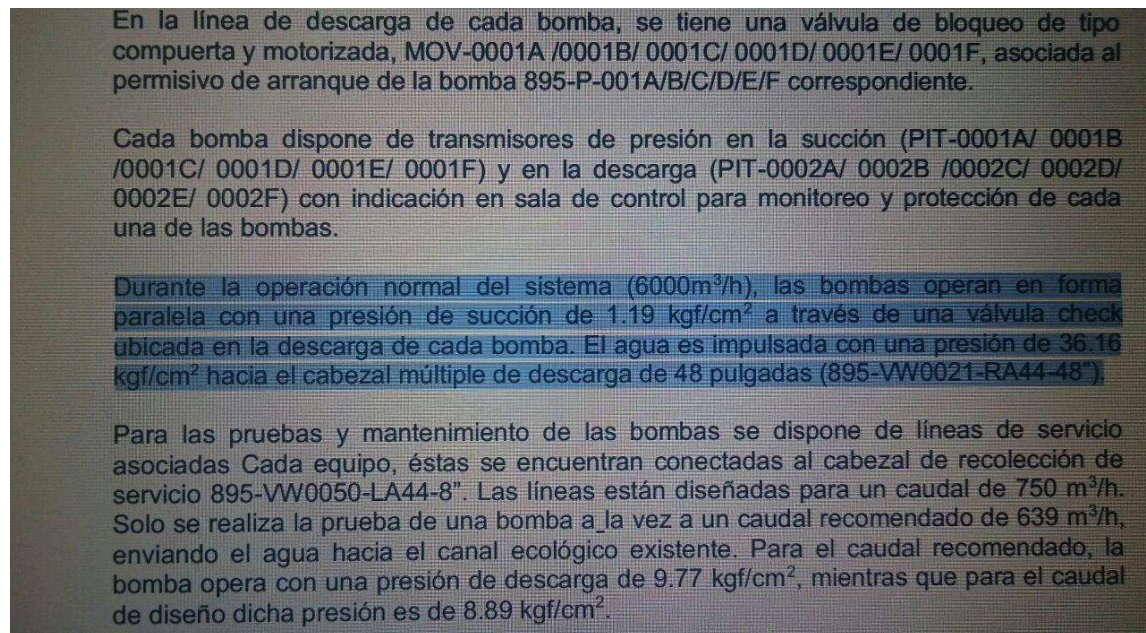


Imagen15 Extracto de las pruebas de funcionalidad (Refinería Del Pacifico)

En pocas palabras, la presión inicial con la que fue impulsada el agua en el acueducto fue de 36.16 kgf/cm².

También se puede notar que para un caudal de diseño de 750 m³/h se tuvo una presión de 8.89 kgf/cm², mientras que para un caudal recomendado de 639 m³/h la bomba operaba con una presión de descarga de 9.77kgf/cm²

Aquí se puede obtener un valor de error relativo solo de referencia, ya que los caudales son diferentes

$$e_{rel} = \frac{f_m - f_r}{f_r}$$

$$e_{rel} = \frac{8.89kgf/cm^2 - 9.77kgf/cm^2}{9.77kgf/cm^2}$$

$$e_{rel} = -\frac{0.88\text{kgf/cm}^2}{9.77\text{kgf/cm}^2}$$

$$e_{rel} = -0,090072$$

Este valor de error relativo puede llevarse a porcentual multiplicándolo por 100, por lo que se podría decir que la medida de diseño tuvo una variación de 9.0072 % con respecto a la medida de real en cada bomba.

Cabe destacar que mientras más necesidad de caudal, se necesitará mucha más presión para suministrarlo. Si el caudal de diseño es mayor que el caudal recomendado, tiene que cumplirse que la presión de diseño sea mayor que la presión en la que opera la bomba. Dado que la presión en la que operaba la bomba fue mayor con una menor cantidad de caudal que el de diseño, se puede deducir que el error relativo es mucho mayor.

Ya que se tiene el valor de presión real que debe llegar al cabezal múltiple para el funcionamiento correcto del sistema, fue posible establecer un error relativo en cuanto a la modelación matemática planteada; ya que el caudal no pertenece a ninguno de los escenarios planteados se tuvo que establecer un escenario de prueba en donde el agua sea impulsada a 6000 m³/h.

Uno de los datos de interés a tomar en cuenta para emular el modelo matemático fue la presión final del acueducto, en el análisis hidráulico del caudal de diseño para un caudal de 6600 m³/h se mencionó este dato ya que salida del acueducto va al pie de los tanques, los cuales tienen 16.8 metros de altura y con una pérdida por la válvula de entrada al tanque de 0.3 bar equivalente a 3 metros de columna de agua, se consideró 19.8 metros de columna de agua para llenar los tanques.

Adicionalmente, se asume el llenado de un tanque a la vez, a un caudal máximo de 4100 m³/h considerando una válvula en la entrada al tanque, algunos fabricantes en sus gráficos de pérdidas de energía dan valores de alrededor de 0,3 bar (3,0 mca) en condición de válvula totalmente abierta.

Por lo tanto, la presión requerida en la entrada al tanque se calcula mediante la adición de 16,8 m y 3,0 mca. La presión calculada de 19,8 mca o en términos generales, 2,0 kgf/cm² (28.4 psi) será un insumo para el cálculo de la carga dinámica total (TDH).

Por otra parte, se considera que la tubería debe llegar al tanque más lejano en la plataforma X4 de la Refinería, sitio donde se instalarán los tanques para el almacenamiento de agua. El nivel del terreno sobre el cual se cimentan los tanques es 277,0 msnm, lo que determina una elevación piezométrica de 297 msnm.

7.3.3 Premisas de diseño del sistema de descarga

- El diseño hidráulico del sistema de descarga de las bombas de la estación "La Esperanza" se realizó para un caudal de 6,600 m³/h, considerando la operación de 06 bombas centrífugas horizontales en paralelo. La capacidad de cada unidad de bombeo será de 1100m³/h.

Image16 Premisas de diseño del sistema de descarga (Refinería Del Pacifico)

Por lo tanto a la salida del acueducto se necesitara una presión de 2kgf/cm².

Escenario de Prueba

Kilómetros	Caudal (m ³ /h)	Velocidad (m/h)	Velocidad (m/s)	Reynolds	f
0 a 69.688	6000	5332,01312	1,481114755	2108034,88	0,012374055
69.688 a 79.517	5700	5065,412464	1,407059018	2002633,136	0,012415037
79.517 a 79.701	4450	3954,576397	1,098493444	1563459,203	0,012633273
79.701 a 93	4000	3554,675413	0,987409837	1405356,587	0,012738313

SUMA								
=9807*(F7335-F7334+(SQ\$6*PO)TENCIA(\$P\$6;2)*(C7335-C7334)/27,47746)+G7335)								
	C	D	E POTENCIA(número; potencia)		H	I	J	
	ABSCISA	TERRENO ORIGINAL	COTA TERRENO	Zx	hv	deltaP	Px (N/m2)	LP
1								
2	0,2	68,66		66,18	0	1,80217339	3416168,945	414,519854
3	3,08	68,68		66,18	0	25,9512968	3416142,994	414,517208
4	5,17	68,69		66,18	0	18,8327119	3416124,161	414,515287
5	16,19	68,7		65,77	0	-3921,5702	3420045,732	414,505162
6	27,71	68,67		65,38	0	-3720,9248	3423766,656	414,494577
7322	92875,82		272,24	269,59	0	811,93062	228723,1135	292,912434
7323	92869,95		272,23	269,64	0	465,886995	228257,2265	292,914929
7324	92882,07		272,28	269,69	0	540,859645	227716,3669	292,909778
7325	92893,5		272,4	269,75	0	636,054096	227080,3128	292,904921
7326	92905,61		272,45	269,80	0	540,81797	226539,4948	292,899775
7327	92917,74		272,48	269,86	0,08953881	1517,07846	225022,4164	292,805082
7328	92929,85		272,43	269,91	0	540,81797	224481,5984	292,799936
7329	92941,97		272,43	269,97	0	638,929645	223842,6687	292,794785
7330	92954,09		272,49	270,03	0	638,929645	223203,7391	292,789635
7331	92966,21		272,76	270,08	0	540,859645	222662,8794	292,784484
7332	92978,33		273,16	270,39	0	3090,67964	219572,1998	292,779334
7333	92990,36		273,76	270,95	0	5542,05457	214030,1452	292,774222
7334	93000		273,22	270,41	0	-5255,6057	219285,7509	292,770126
7335	93002,38		274,32	271,50	1,28338965	=9807*(F733	196000	291,485724
7336								
7337						p inicial	34,85888518	kg/cm2
7338						p final		2 kg/cm2
7339								

Imagen17 Cálculos realizados para el escenario de prueba (Derecho de autoría del investigador)

L	M	N	O	P	Q
General	3220170,75				
Presion de Bombe	3416170,75	N/m^2	KM	V	F
Velocidad	1,481115	m/s	0 a 69.688	1,48111476	0,01150879
factor de friccion	0,01237		69.688 a 79.517	1,40705902	0,01156249
K valv. Aire	1,8		79.517 a 79.701	1,09849344	0,01184354
K valv. Conica	24		79.701 a 93	0,98740984	0,01197615

Imagen18 Cálculos realizados para el escenario de prueba (Derecho de autoría del investigador)

El resultado de la modelación matemática fue que se necesita una presión inicial en el acueducto de 3416170,748 N/m² para obtener una presión de salida de 196000 N/m², la cual es equivalente a 2kgf/cm².

$$3416170,748 \frac{N}{m^2} \times \frac{1 \text{ kgf}}{9.8 N} \times \frac{1 m^2}{10000 cm^2} = 34,85888518 \frac{kgf}{cm^2}$$

Transformando el valor que fue resultado de la modelación matemática, este da el valor de 34,85888518 kgf/cm², dado que la presión inicial con la que es impulsada el agua en el acueducto es de 36.16 kgf/cm². Aquí se pudo obtener un valor de error relativo sobre la modelación matemática planteada

$$e_{rel} = \frac{f_m - f_r}{f_r}$$

$$e_{rel} = \frac{34,85888518 \text{ kgf/cm}^2 - 36.16 \text{ kgf/cm}^2}{36.16 \text{ kgf/cm}^2}$$

$$e_{rel} = - \frac{1,30111482121806 \text{ kgf/cm}^2}{36.16 \text{ kgf/cm}^2}$$

$$e_{rel} = -0,035982158$$

Este valor de error relativo puede llevarse a porcentual multiplicándolo por 100, por lo que se podría decir que la medida de la modelación matemática varió con la medida real en un 3,598215767 % con respecto a la medida real

Dado que se hicieron cambios en el caudal total de 5500 a 6000 metros cúbicos por hora, y a la presión final contemplada en este proyecto de investigación; se hizo un ajuste a los escenarios anteriormente planteados y la emulación de las presiones que se desarrollarán en el acueducto.

Escenario	Qd1	Qd2	Qd3	Q4	Total
1	0	0	0	4000	4000
2	0	0	450	4000	4450
3	0	1250	0	4000	5250
4	0	1250	450	4000	5700
5	300	0	0	4000	4300
6	300	0	450	4000	4750
7	300	1250	0	4000	5550
8	300	1250	450	4000	6000

Escenario	Total	Presión (kg/cm2)
1	4000	28,93
2	4450	30,10
3	5250	32,45
4	5700	33,94
5	4300	29,60
6	4750	30,83
7	5550	33,30
8	6000	34,86

5. CONCLUSIONES

La modelación matemática planteada varió con las pruebas de funcionabilidad que se ejecutaron en el acueducto por 3.6%; mientras que, con las variables de diseño puede notarse que en cada bomba el error relativo es del más de 9%. Por esto, la modelación matemática y la emulación del acueducto se acercan mucho más al funcionamiento.

La modelación matemática planteada puede ser usada para verificar o auditar acueductos con las características de distribución ramificada abierta, así como también puede utilizarse en programas de simulación para acueductos con las características antes mencionadas.

El 3.6% de error relativo puede ser provocado por pérdidas de fricción no contempladas en este proyecto de investigación, como pueden ser los cambios direccionales horizontales de flujo, y las características del fluido, ya que el acueducto suministra agua cruda; la turbiedad y compuestos disueltos son variables que afectan los cálculos.

Plantear la teoría en la práctica permite identificar errores de transcripción, de topografía y de coordenadas. En el caso de la topografía, aumentos o caídas grandes de presión son puntos de interés que pueden ser encontrados visualmente en el gráfico de presiones del acueducto; así mismo con el gráfico de la línea piezométrica, que si presenta picos no pertenecientes a los accesorios o estaciones de bombeo, también son puntos a verificar.

6. RECOMENDACIONES

Los valores de pérdida de energía debida a fricción por longitud de tubería y por accesorios son resultados netamente experimentales ya que la cantidad de variables que pueden afectar el cálculo son variadas, entre el cambio de temperatura del ambiente, la composición química del agua, tiempo de uso del acueducto, falla de válvulas de aire entre otros factores externos que se producen aleatoriamente o en el transcurso del tiempo, por lo que los valores que tome el

factor de fricción o el valor de k dependerán de las condiciones actuales y transitorias que se produzcan.

Si se desea usar la modelación matemática para otros tipos de fluidos se afectara el valor de la densidad y cálculo del valor de Reynolds, con ello la definición de las variables y régimen del sistema, la temperatura es un factor que puede afectar directamente la densidad del fluido por lo que si el calor no es fácilmente disipado sería necesario medir el cambio de temperatura que se produce y con ello la densidad.

7. BIBLIOGRAFÍA

Avila, K.; D. Moxey, A. de Lozar, M. Avila, D. Barkley, B. Hof . (2011). *The Onset of Turbulence in Pipe Flow*. Science.

Enciclopedia Libre Universal en Español. (20 de Septiembre de 2012). Recuperado el 20 de Noviembre de 2016, de Enciclopedia Libre Universal en Español: http://enciclopedia.us.es/index.php/Enciclopedia_Libre_Universal_en_Espa%C3%B1ol

Alvarez, R. A. (2014). ESTUDIO PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO DEL. Ocaña, Colombia: UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA.

(1983). Sistema de Abastecimiento de Agua para pequeñas comunidades. En C. I. CIR, *Tecnología de pequeños sistemas de Abastecimiento para países en desarrollo* (págs. 269-287). La Haya, Países Bajos, Holanda: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y ciencias del Ambiente.

Ingeniería Rural. (2011). *Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real*. Recuperado el 19 de Octubre de 2016, de Hidrodinámica. Generalidades: https://www.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Temas/Tema4.pdf

- Modelación Matemática - Una Introducción al método.* (s.f.). Recuperado el 20 de Noviembre de 2016, de Modelación Matemática - Una Introducción al método: <http://www.mathmodelling.org/>
- Mott, R. L. (2006). Mecánica de Fluidos, Sexta Edición. En R. L. Mott, *Mecánica de Fluidos* (págs. 154-245). Mexico: Pearson Educación.
- Refinería del Pacífico. (17 de Marzo de 2016). *Acueducto La Esperanza – Refinería Del Pacífico Garantiza Abastecimiento De Agua Para Tres Cantones Manabitas*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2016, de Refinería del Pacífico Eloy Alfaro RDP-CEM: <http://www.rdp.ec/?p=3202>
- Robert Resnick, D. H. (2004). *Física* (4ta. Edición Vol. 1 ed.). México: CECSA.
- Shames, I. H. (1995). *MECÁNICA DE FLUIDOS*. Colombia: Mc GRAW-HILL.
- Streeter. (2000). Mecánica de los fluidos. En L. W. treeter Victor, *Mecánica de los fluidos*. McGraw Hill.
- Symon, K. (1971). *Mechanics* (3era Edicion ed.). Addison-Wesley.
- White, F. (2008). *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill.
- Wikipedia. (11 de Septiembre de 2016). *Wikipedia*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2016, de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org>
- Yunes A. Çengel, John M. Cimbala. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Mexico: Mc GRAW-HILL.

8. ANEXOS

Anexo 1

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m ²)
0	9,805	999,8	1,98 · 10 ⁶	1,781 · 10 ⁻³	1,785 · 10 ⁻⁶	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	2,05 · 10 ⁶	1,518 · 10 ⁻³	1,519 · 10 ⁻⁶	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	2,10 · 10 ⁶	1,307 · 10 ⁻³	1,306 · 10 ⁻⁶	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	2,15 · 10 ⁶	1,139 · 10 ⁻³	1,139 · 10 ⁻⁶	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	2,17 · 10 ⁶	1,102 · 10 ⁻³	1,003 · 10 ⁻⁶	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	2,22 · 10 ⁶	0,890 · 10 ⁻³	0,893 · 10 ⁻⁶	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	2,25 · 10 ⁶	0,708 · 10 ⁻³	0,800 · 10 ⁻⁶	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	2,28 · 10 ⁶	0,653 · 10 ⁻³	0,658 · 10 ⁻⁶	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	2,29 · 10 ⁶	0,547 · 10 ⁻³	0,553 · 10 ⁻⁶	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	2,28 · 10 ⁶	0,466 · 10 ⁻³	0,474 · 10 ⁻⁶	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	2,25 · 10 ⁶	0,404 · 10 ⁻³	0,413 · 10 ⁻⁶	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	2,20 · 10 ⁶	0,354 · 10 ⁻³	0,364 · 10 ⁻⁶	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	2,14 · 10 ⁶	0,315 · 10 ⁻³	0,326 · 10 ⁻⁶	0,0608	70,10
100	9,399	958,4	2,07 · 10 ⁶	0,282 · 10 ⁻³	0,294 · 10 ⁻⁶	0,0589	101,33

Ingeniería Civil, Construcción y el Medio Ambiente de Madrid (España)

Fuente: <http://www.miliarium.com/>

Anexo 2

En la siguiente tabla se muestran algunos valores de rugosidad absoluta para distintos materiales:

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES				
Material	ϵ (mm)		Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015		Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01		Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024		Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015		Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024		Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024		Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003		Hormigón	0,3-3,0

Ingeniería Civil, Construcción y el Medio Ambiente de Madrid (España)

Fuente: <http://www.miliarium.com/>

Anexo 3

VALORES DEL COEFICIENTE K EN PÉRDIDAS SINGULARES

Accidente	K	L/D
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2,5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0,2	13
Válvula de compuerta (abierta 3/4)	1,15	35
Válvula de compuerta (abierta 1/2)	5,6	160
Válvula de compuerta (abierta 1/4)	24	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
T por salida lateral	1,80	67
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0,90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0,75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0,60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0,45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0,40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0,35	-

Ingeniería Civil, Construcción y el Medio Ambiente de Madrid (España)

Fuente: <http://www.miliarium.com/>