

Desarrollo de un software pedagógico para el diseño de sistemas hidráulicos para el bombeo  
de crudo

Tatiana Marlén Cárdenas Robles y Camilo Núñez Sanjuán

Trabajo de Grado para Optar por el título de ingeniero de petróleos

Director:

Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Msc. En Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de físico químicas

Escuela de ingeniería de petróleos

Bucaramanga

2020

## **Dedicatoria**

*En primer lugar, a Dios quien me da fortalezas para seguir cada día y me ha permitido llegar hasta este momento tan importante en mi formación profesional.*

*A mis padres, Ana Robles y José Cárdenas quienes me han apoyado en cada paso que doy, ellos son mis pilares.*

*A mi hermanito Jersson quien siempre me ha apoyado incondicionalmente.*

*A mi nonita, mi angelito.*

*A mis amigos con los cuales he compartido momentos inolvidables, que siempre están ahí para apoyarme y sacarme sonrisas, ustedes le agregan alegría a mi vida.*

*A mi compañero de tesis y amigo Camilo quien me ha acompañado en este viaje.*

***Tatiana Cárdenas.***

### **Dedicatoria**

*A Dios como ser supremo, que me permitió comprender que solo los tiempos de él son perfectos y darme la fuerza necesaria para no decaer en los instantes de duda.*

*A mis padres, Gloria Teresa Sanjuán Villalba y Ramón Antonio Núñez Mejía, por ser mis pilares, mis ejemplos y guías, por enseñarme que todo se puede construir y mantener si se está basado en los valores, que siempre se debe ser un gran profesional, pero aún mejor una gran persona. Son ellos mis motores.*

*A mi abuela Ofelia María Villalba que, aunque no esté a mi lado, fue como una segunda madre que me enseñó a ser correcto y descubrir en los momentos más sutiles la belleza de la vida.*

*A mi hermana Nathalia Núñez Sanjuán, por ser la amiga perfecta e incondicional, por apoyarme, ayudarme y defenderme en los momentos que la necesito. Es ella una mujer emprendedora que me hace ver la vida como una lucha diaria.*

*A mis dos sobrinas Gloria Stefanny y María Victoria, son ellas mis dos luceros, que me hacen luchar para culminar mi carrera, son para mí más que mis sobrinas, son como mis hijas, por las que cada día busco actuar mejor y convertirme para ellas en un buen referente.*

*A mi mejor amigo Jhan Carlos Hernández Santos, que me ha acompañado durante estos momentos y enseñarme a ver las cosas de manera positiva, aun cuando se ponen difíciles y tensas, gracias por ser mi compañía y apoyo.*

*A mi amiga y compañera de tesis Tatiana, quien fue un apoyo en la elaboración de este proyecto, pues fue una compañera única, que siempre estuvo en los momentos difíciles.*

*A cada una de las personas que de una manera u otra llegaron a mi vida para transformarla y hacer de mí un profesional y persona con valores que me hacen único.*

**Camilo Núñez Sanjuán**

### **Agradecimientos**

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A la Universidad Industrial de Santander por abrirnos sus puertas y brindarnos una educación de calidad, con profesores como nuestro director el Msc. Manuel Cabarcas, que nos acompañaron en nuestro proceso de formación, brindándonos su tiempo, dedicación y liderazgo que fueron de gran importancia para la culminación de este software.

Gracias a nuestras familias por sus esfuerzos, dedicación y sobre todo por el amor incondicional que nos brindan, además por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

## Contenido

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Introducción .....  | 15          |
| 1. Generalidades impulsión de fluidos .....                   | 17          |
| 1.1. Impulsión de líquidos.....                               | 18          |
| 1.2. Cargas en el sistema.....                                | 18          |
| 1.3. Régimen de flujo.....                                    | 21          |
| 2. Marco teórico bombas.....                                  | 23          |
| 2.1. Clasificación de las bombas.....                         | 23          |
| 2.2. Bombas Centrífugas.....                                  | 24          |
| 2.3. Características de las bombas centrífugas.....           | 26          |
| 2.4. Componentes de una bomba centrífuga.....                 | 26          |
| 2.4.1. Carcasa o Voluta .....                                 | 27          |
| 2.4.2. Rodete .....   | 27          |
| 2.4.3. Eje .....  | 29          |
| 2.4.4. Anillo de desgaste o aros de cierre .....              | 29          |
| 2.4.5. Estopa.....  | 30          |
| 2.5. Curvas que modelan el comportamiento de las bombas ..... | 30          |
| 2.5.1. Curva característica de una bomba .....                | 30          |
| 2.5.2. Otras curvas características.....                      | 31          |
| 2.5.3. Curva de potencia absorbida caudal: .....              | 31          |

|  |    |
|--|----|
| 2.5.4. Rendimiento total de la bomba .....                       | 32 |
| 2.5.5. Rendimiento mecánico ( $\eta_m$ ): .....                  | 32 |
| 2.5.6. Rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ ):.....                | 33 |
| 2.5.7. Rendimiento hidráulico ( $\eta_h$ ):.....                 | 33 |
| 3. Principales fenómenos físicos en un sistema hidráulico.....   | 35 |
| 3.1. Fenómenos hidráulicos .....                                 | 35 |
| 3.1.1. Fenómeno de cavitación .....                              | 35 |
| 3.1.2. Cavitación de una bomba.....                              | 36 |
| 3.1.3. Golpe de ariete .....                                     | 39 |
| 3.2. Fenómenos mecánicos .....                                   | 39 |
| 3.3. Fenómenos térmicos .....                                    | 42 |
| 4. Modelos matemáticos para un sistema de flujo monofásico ..... | 44 |
| 4.1. Ecuación de continuidad .....                               | 44 |
| 4.2. Conservación de la energía ecuación de Bernoulli .....      | 45 |
| 4.3. Ecuación de Darcy-Weisbach .....                            | 48 |
| 4.4. Número de Reynolds.....                                     | 49 |
| 4.5. Pérdida por fricción en el flujo laminar .....              | 50 |
| 4.6. Pérdidas de fricción en el flujo turbulento .....           | 51 |
| 4.7. Pérdidas de fricción en flujo transitorio.....              | 51 |
| 4.8. Diagrama de Moody .....                                     | 52 |
| 4.9. Pérdidas por fricción en válvulas y accesorios. ....        | 53 |

|   |    |
|---|----|
| 4.10. Características de funcionamiento de una bomba..... | 55 |
| 4.11. Carga estática de la bomba. ....                    | 56 |
| 4.12. Potencia que requieren las bombas .....             | 57 |
| 5. Metodología de cálculo.....                            | 58 |
| 5.1. Metodología de cálculo módulo de tuberías .....      | 58 |
| 5.2. Metodología de cálculo módulo de accesorios .....    | 62 |
| 5.3. Metodología de cálculo módulo de bomba .....         | 62 |
| 5.4. Metodología de cálculo módulo de tanques.....        | 63 |
| 5.5. Metodología de módulo sistema hidráulico .....       | 65 |
| 6. Software pedagógico HYDRA .....                        | 69 |
| 6.1. Lenguaje de programación PHP .....                   | 69 |
| 6.2. Descripción del programa HYDRA.....                  | 71 |
| 6.2.1. Módulo de tuberías .....                           | 73 |
| 6.2.2. Módulo de accesorios .....                         | 74 |
| 6.2.3. Módulo de bombas.....                              | 75 |
| 6.2.4. Módulo de tanques.....                             | 76 |
| 6.2.5. Módulo sistema hidráulico.....                     | 78 |
| 6.3. Validación .....                                     | 78 |
| 6.3.1. Validación módulo tuberías .....                   | 79 |
| 6.3.2. Validación módulo de accesorios .....              | 79 |
| 6.3.3. Validación módulo de bombas.....                   | 80 |

6.3.4. Validación módulo de tanques .....81

6.3.5. Validación módulo sistema hidráulico.....84

Conclusiones ..... 85

Recomendaciones .....87

Referencias..... 88

Anexos .....90

**Lista de figuras**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1. Sistema hidráulico típico en el que se bombea un líquido incompresible.....                           | 19          |
| Figura 2. Región de entrada en un tubo para el caso de flujo laminar.....                                       | 21          |
| Figura 3. Región de entrada en un tubo para el caso de flujo turbulento .....                                   | 22          |
| Figura 4. Clasificación general de las bombas hidráulicas .....   | 24          |
| Figura 5. Partes de una bomba centrífuga.....   | 26          |
| Figura 6. Carcasa de bomba centrífuga.....  | 27          |
| Figura 7. Rodete de bomba centrífuga.....   | 28          |
| Figura 8. Imagen de un eje de una bomba .....   | 29          |
| Figura 9. Anillo de desgaste de una bomba centrífuga.....   | 30          |
| Figura 10. Curvas características de una bomba.....   | 31          |
| Figura 11. Daños por cavitación en una bomba de engranajes externos. ....                                       | 36          |
| Figura 12. Desplazamiento de una partícula al ingresar por el centro del impulsor de una bomba centrífuga ..... | 41          |
| Figura 13. Vórtice libre con una fuente puntual .....   | 41          |
| Figura 14. Ley de Fourier en una tubería.....   | 42          |
| Figura 15. Principio de continuidad.....  | 45          |
| Figura 16. Elemento de flujo .....  | 46          |
| Figura 17. Flujo a través de una tubería.....   | 47          |
| Figura 18. Diagrama de Moody .....  | 52          |
| Figura 19. Grafica rugosidad relativa .....   | 53          |
| Figura 20. Fórmulas para hallar la constante K de los accesorios más comunes .....                              | 54          |
| Figura 21. Fórmulas para hallar la constante K las válvulas más comunes.....                                    | 55          |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22. Carga estática.....  | 56 |
| Figura 23. Tubería.....   | 58 |
| Figura 24. Sistema hidráulico típico .....  | 65 |
| Figura 25. Interfaz del software pedagógico HYDRA. ....                               | 72 |
| Figura 26. Video pedagógico en el software. ....                                      | 72 |
| Figura 27. Datos de ingreso para el módulo uno, tuberías.....                         | 73 |
| Figura 28. Grafica de la Rugosidad relativa, suministrada por el Software HYDRA. .... | 74 |
| Figura 29. Módulo dos, accesorios. ....   | 75 |
| Figura 30. Módulo tres, diseño de bombas. ....  | 76 |
| Figura 31. Resultado obtenido del dimensionamiento del tanque. ....                   | 76 |
| Figura 32. Presentación de HYDRA, en dispositivos móviles. ....                       | 77 |
| Figura 33. Módulo cinco, sistema hidráulico.....                                      | 78 |
| Figura 34. Resultados diseño de tanques. ....   | 82 |
| Figura 35. Resultado diseño de tanques HYDRA .....                                    | 82 |

**Lista de tablas**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. Coeficiente de fricción $f_T$ .....       | 55          |
| Tabla 2. Dimensionamiento de tanques. ....         | 64          |
| Tabla 3. Validación del módulo de tuberías. ....   | 79          |
| Tabla 4. Validación del módulo de accesorios. .... | 80          |
| Tabla 5. Validación módulo de bombas. ....         | 81          |
| Tabla 6. Validación módulo de tanques.....         | 83          |
| Tabla 7. Validación sistema hidráulico.....        | 84          |

**Lista de anexos**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Anexo A. Manual de instalación de HYDRA.....               | 90          |
| Anexo B. Manual de uso del software pedagógico HYDRA ..... | 97          |
| Anexo C.Ejemplo guía del uso del software HYDRA .....      | 111         |

## Resumen

**Título:** Desarrollo de un software pedagógico para el diseño de sistemas hidráulicos para el bombeo de crudo.\*

**Autores:** Tatiana Marlén Cárdenas Robles, Camilo Núñez Sanjuán\*\*

**Palabras clave:** Software, hidráulica, bombas, bombeo de fluidos.

### Descripción:

Este trabajo presenta un software didáctico desarrollado para el diseño de sistemas hidráulicos de bombeo de crudo; construcción de bombas, líneas y accesorios en superficie, permitiendo cumplir con los requerimientos de caudal y velocidad del fluido a través de las tuberías. El software ha sido diseñado con la misma metodología y orden presentado en las clases del curso de facilidades de superficie dictado en la Universidad Industrial de Santander, haciendo más didáctica la clase y acercándolos a los estudiantes un poco más a la realidad.

En los últimos años podemos ver como la tecnología avanza a pasos agigantados, por lo que la implementación de nuevas tecnologías para la enseñanza es indispensable para la formación de los estudiantes, el software presenta una alternativa de aprendizaje llevando los conocimientos teóricos a la práctica, facilitando el desarrollo de proyectos y/o mejorar el análisis de problemas reales, este software brinda a los futuros ingenieros una herramienta pedagógica que les dará una nueva perspectiva de los fenómenos presentes en el transporte de crudo a través de una tubería y los acercará un poco más a la realidad del diseño de bombas. Ya que un adecuado diseño de un sistema hidráulico es de suma importancia en la creación de facilidades de superficie, haciendo que el proceso sea eficientes y con una buena relación costo-beneficio.

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de físico químicas. Escuela de ingeniera de petróleos. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas. Título académico completo de mayor rango. Msc. Ingeniería química.

### Abstract

**Title:** Development of a pedagogical software for the design of hydraulic systems for oil. \*

**Authors:** Tatiana Marlén Cárdenas Robles, Camilo Núñez Sanjuán\*\*

**Key words:** Software, hydraulics, pumps, fluid pumping

#### Description:

This paper presents an educational software developed for the design of hydraulic systems for pumping crude oil: construction of pumps, lines and accessories on the surface, allowing meeting the requirements of flow and velocity of fluids through the pipes, for the use of oil engineering students. The software has been designed with the same methodology and order presented in the classes of the surface facilities course taught at the Industrial University of Santander, making the class more didactic and bringing the students a little closer to reality.

In recent years, we can see how technology advances by leaps and bounds, so the implementation of new technologies for teaching is essential for the training of students. The software presents a learning alternative by taking theoretical knowledge into practice, facilitating the development of projects and / or improve the analysis of real problems, this software provides future engineers with a pedagogical tool that will give them a new perspective on the phenomena present in the transport of crude through a pipeline and bring them a little closer to the reality of pump design. Since a proper design of a hydraulic system is of utmost importance in the creation of surface facilities, making the process efficient and cost-effective.

\* Degree Work

\*\* Faculty of physicochemical. School of Petroleum Engineering. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas. Msc. Chemical engineering.

## Introducción

En los últimos años podemos ver como la tecnología avanza a pasos agigantados, por lo que la implementación de nuevas tecnologías para la enseñanza es indispensable para la formación de los estudiantes en las distintas áreas del conocimiento.

El uso de softwares educativos para llevar los conocimientos teóricos a la práctica son una herramienta valiosa para el aprendizaje, ya que permite la adquisición de saberes y el desarrollo de destrezas, reduciendo los tiempos de cálculo que normalmente se harían a mano, destinando el tiempo para la comprensión de los fenómenos presentes en el proceso.

El presente trabajo está enfocado en el desarrollo de un software didáctico para el diseño de sistemas hidráulicos de bombeo de crudo, que permitirá a los futuros ingenieros tener una herramienta pedagógica que les brinda una nueva perspectiva de la hidráulica en el bombeo de crudo y los acercará un poco más a la realidad del diseño de bombas.

También busca estar a la vanguardia en las técnicas de enseñanza, facilitando el proceso de enseñanza-aprendizaje, abordando el desarrollo de competencias.

El buen diseño del sistema hidráulico es de suma importancia en la creación de facilidades de superficie; que estas estén construidas con las características y requerimientos necesarios para cumplir con la labor que posteriormente desempeñara, hace que los procesos sean más eficientes y con excelentes relaciones costo-beneficios.

El correcto diseño y construcción de bombas, líneas y accesorios en superficie, permitiendo cumplir con los requerimientos de caudal y velocidad de los fluidos a través de las tuberías, optimizando este proceso, buscando la disminución de costos sin afectar el desempeño de las facilidades de superficie.

El software HYDRA está diseñado para el uso en clases de facilidades de superficies haciendo más didáctica la clase y acercándolos a los estudiantes un poco más a la realidad, llevando a los estudiantes a analizar los efectos de decisión sobre los parámetros y las condiciones operativas de los componentes del sistema.

## 1. Generalidades impulsión de fluidos

El desplazamiento de fluidos, líquidos o gases (en ocasiones incluso con sólidos en suspensión) se desarrolla normalmente en sistemas de flujo, más o menos largos y complejos que implican conducciones rectas, generalmente cilíndricas de diámetros variados, enlazadas por uniones convenientes, curvaturas, codos, válvulas, etc. Estos sistemas el fluido sólo fluyen espontáneamente si su energía total disminuye en la dirección del flujo. De no ser así, habrá que comunicarles energía mediante dispositivos tales como bombas, en el caso de líquidos, o compresores, soplantes o ventiladores, en el caso de gases.

La cantidad de energía que deberá suministrarse a un fluido para conseguir su desplazamiento por un sistema determinado dependerá de su caudal, de la altura, de la presión requerida al final de su recorrido, de las longitudes y diámetros de conducción, de los accidentes (ensanchamientos, estrechamientos, curvaturas válvulas, codos, etc.) y de las propiedades físicas del fluido, principalmente su viscosidad y su densidad. (Martín, Salcedo & Font, 2011)

La ecuación de Bernoulli:

$$\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \int_{P_1}^{P_2} v dp + \sum F = W \left( \frac{J}{kg} \right) \quad (1)$$

aplicada a los extremos de un sistema de flujo nos permitirá el cálculo de la energía (W) que debe comunicarse a la unidad de masa del fluido circulante. Con ella y el caudal de flujo másico (m) se obtiene la potencia teórica necesaria para el flujo deseado:

$$P = mW (W) \quad (2)$$

Los tipos de flujos y fluidos que pueden presentarse pueden dividirse en flujo de líquidos (incompresibles) y flujo de gases (compresibles).

### 1.1. Impulsión de líquidos

Normalmente el balance de energía mecánica entre dos puntos se expresa mediante la ecuación de Bernoulli (Ec. 1) en unidades de energía por unidad de masa (J/kg). La ecuación se obtiene dividiendo ambos lados por la aceleración de la gravedad  $g$ , teniendo unidades de J/N, que dimensionalmente es equivalente a longitud (m). De esta forma, los términos sumandos de la ecuación de Bernoulli se les denominan cargas o alturas. Considerando que los líquidos son incompresibles, la ecuación resuelta queda de esta forma:

$$\left( \frac{V_2^2}{2g \alpha_2} - \frac{V_1^2}{2g \alpha_1} \right) + (z_2 - z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\rho g} + \frac{\Sigma F}{g} = H \quad (3)$$

Donde  $H = W/g$  y se le denomina altura proporcionada por la bomba, mientras que el término  $\Sigma F/g$  se le suele denominar pérdida de carga. (Martín et al., 2011)

### 1.2. Cargas en el sistema

Un sistema típico en el que se bombea un líquido es el indicado en la Figura 1:

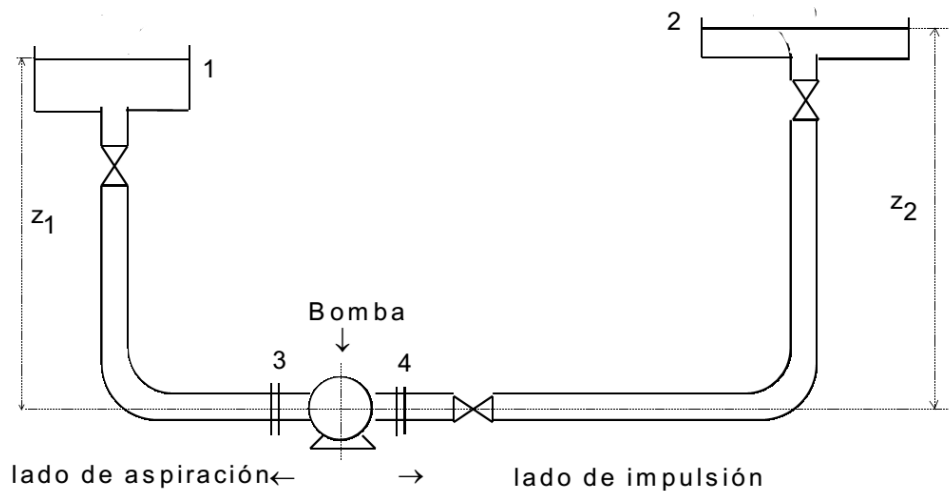


Figura 1. Sistema hidráulico típico en el que se bombea un líquido incompresible. Martín, I., Salcedo, R., & Fort, R. (2011). *Mecánica de fluidos Tema2. Impulsión de fluidos*. Universidad de Alicante. p.4.

Donde  $z_3 = z_4$  que, al poder tomarse como origen de alturas, es igual a cero. A partir de este esquema se definen los siguientes conceptos.

Carga de aspiración o succión: Es el valor de la energía que posee el fluido al llegar a la boca de succión de la bomba hidráulica, expresada en metros de líquido. Se define como la suma de la carga de presión, la carga cinética y la altura geográfica o cota en la boca de succión de la bomba, de acuerdo con la figura anterior:

$$h_a = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g \alpha_3} + z_3 \quad (4)$$

Si se plantea el balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 3:

$$\frac{V_1^2}{2g \alpha_1} + z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g \alpha_3} + z_3 \quad (5)$$

de donde:

$$h_a = \left( \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g \alpha_3} + z_3 \right) = \frac{V_1^2}{2g \alpha_1} + z_1 + \frac{P_1}{\rho g} - \frac{\sum F_a}{g} \quad (6)$$

$\Sigma F_a / g =$  pérdida de carga por fricción en la zona de aspiración.

Carga de impulsión: Es el valor de la energía que posee el fluido justo en el punto de salida de la bomba hidráulica, expresada en metros de líquido. Se define como la suma de la carga de presión, la carga cinética y la altura geométrica en la boca de impulsión de la bomba. En nuestro esquema,

$$h_i = \frac{P_4}{\rho g} + \frac{V_4^2}{2g \alpha_4} + z_4 \quad (7)$$

Si, como antes, se plantea un balance de energía mecánica entre 4 y 2, se obtiene que,

$$h_i = \frac{V_2^2}{2g \alpha_2} + z_2 + \frac{P_2}{\rho g} - \frac{\Sigma F_i}{g} \quad (8)$$

$\Sigma F_i / g =$  pérdida de carga por fricción en la zona de impulsión.

Carga total: Es la diferencia algebraica entre la carga de impulsión y la de aspiración, y teniendo en cuenta las ecuaciones 6 y 8.

$$h = h_i - h_a = (z_2 - z_1) + \left( \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \right) + \left( \frac{V_2^2}{2g \alpha_2} - \frac{V_1^2}{2g \alpha_1} \right) + \frac{\Sigma F_a}{g} + \frac{\Sigma F_i}{g} \quad (9)$$

Si se planteara un balance de energía mecánica entre 1 y 2, el parámetro definido como carga total del sistema corresponde a la energía necesaria por unidad de peso para que circule el líquido de 1 a 2, por lo que esta carga corresponde a la energía requerida por una bomba para impulsar el fluido.

De las ecuaciones 6 y 8 se deduce que la carga de aspiración disminuye y la de impulsión aumenta a medida que aumenta el caudal del líquido (ya que aumentan  $\Sigma F_a$  y  $\Sigma F_i$ ), con lo que la carga total necesaria para impulsar el líquido lógicamente es mayor cuanto más grande es el caudal que tiene que circular. (Martín et al., 2011)

### 1.3. Régimen de flujo

Cuando un fluido se está moviendo dentro de una tubería puede hacerlo de diferentes formas a esto le llamamos regímenes de flujo estos los podemos clasificar en: laminar y turbulento. Esto depende de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

#### Flujo laminar

En la entrada de su tubería el flujo será uniforme y tendrá una velocidad igual a cero en las paredes la velocidad será cero debido al rozamiento y se desarrolla una capa límite sobre las paredes del tubo. Cuando el flujo se desarrolla completamente la velocidad varia sobre toda la tubería y no hay una capa límite bien definida. (Figura 2) (Martín et al., 2011)

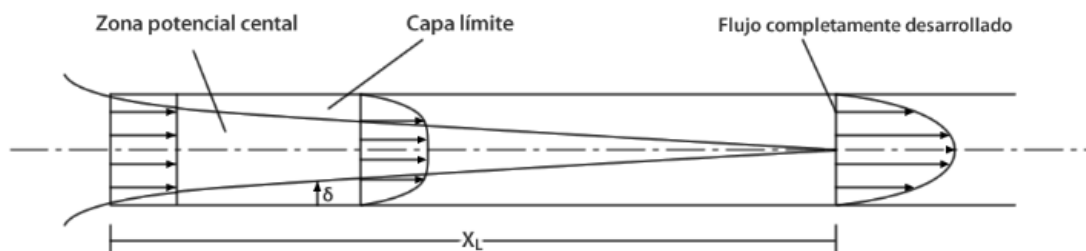


Figura 2. Región de entrada en un tubo para el caso de flujo laminar. Fuente: <https://www.textoscientificos.com/fisica/fluidos/flujo-interno>

## Flujo turbulento

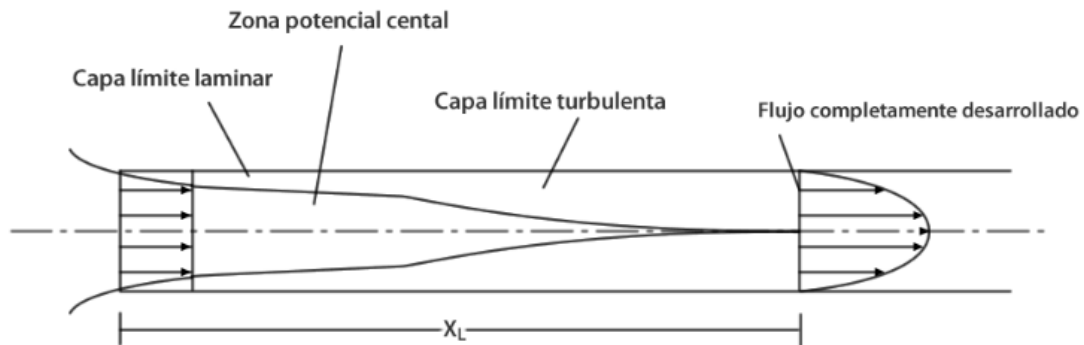


Figura 3. Región de entrada en un tubo para el caso de flujo turbulento. Fuente: <https://www.textoscientificos.com/fisica/fluidos/flujo-interno>

La velocidad es uniforme a la entrada y la capa límite crece con la distancia desde la entrada hasta que el flujo está completamente desarrollado. la parte central del flujo se acelera y a lo largo de una línea de corriente en esta región de corriente libre se observa que la presión decrece. (Figura 3) (Martín et al., 2011)

## **2. Marco teórico bombas**

Comúnmente se piensa que el bombeo se refiere a la presión que se le adiciona a un fluido, sin embargo, las bombas son generadores hidráulicos las cuales absorben energía mecánica y proporcionan energía hidráulica a un líquido, lo cual permite el transporte del fluido normalmente a través de una tubería.

### **2.1. Clasificación de las bombas**

Las bombas se pueden clasificar de manera diversa, de acuerdo con su función, su desplazamiento, a los materiales que la componen, al servicio que ofrecen, etc.

Según su desplazamiento se pueden dividir en dos grandes grupos (Figura 4), las primeras son las bombas de desplazamiento positivo o volumétricas, que se caracterizan por la transferencia de energía de presión al fluido mediante volúmenes confinados; produciéndose un llenado y vaciado en las cámaras generando el trasiego de cantidades discretas de fluido desde la aspiración hasta la impulsión, siendo común en ellas el uso de pistón, tornillo o engranaje. El segundo grupo son las bombas cinéticas o dinámicas, cuyo principio de funcionamiento es impartir velocidad y presión al fluido a medida que este pasa por el impulsor de la bomba, que gira a altas velocidades, convirtiendo la velocidad del fluido en energía de presión; el funcionamiento de estas bombas se basa en el principio de transferencia de energía centrífuga.

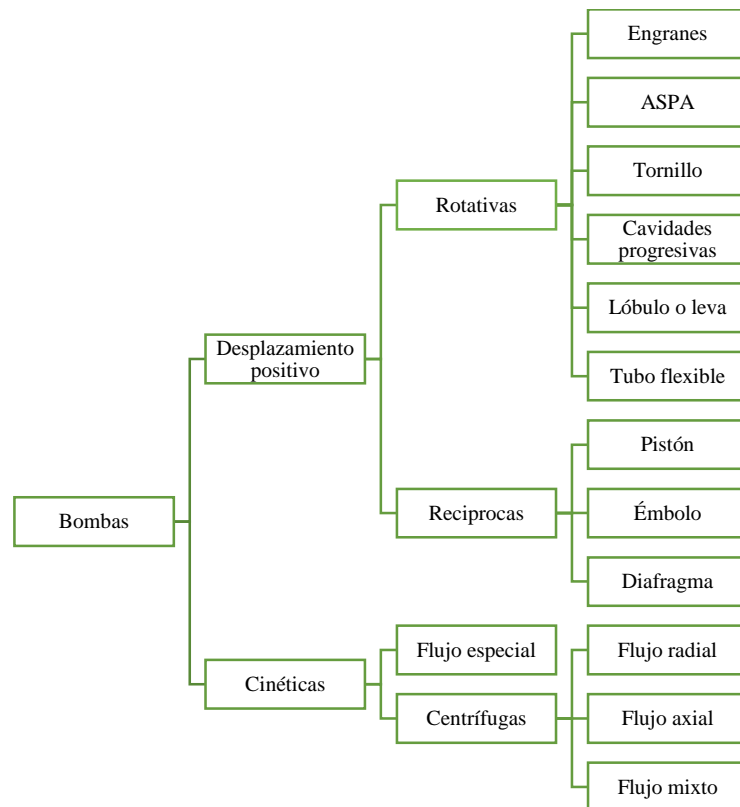


Figura 4. Clasificación general de las bombas hidráulicas. Fuente: Autor

## 2.2. Bombas Centrífugas

Las bombas centrífugas, son herramientas que constan de una carcasa que guarda y protege al impulsor, que se encuentra sujeto a un eje. En la entrada de la bomba centrífuga el líquido se ve forzado a entrar a la carcasa por la fuerza de succión a presión atmosférica o a presión cualquiera con la que venga el fluido aguas arriba. Cuando el impulsor gira, el líquido es trasladado hacia la descarga de la bomba, creando un vacío un área de presión reducida en la entrada de la carcasa de la bomba, la cual es más alta que la presión reducida en la entrada del impulsor, forzando el fluido dentro del impulsor para llenar el vacío.

Una vez el líquido este en el impulsor en rotación, entra a la bomba moviendo en medio de los alabes del impulsor, incrementando la velocidad a medida que avanza.

Cuando el líquido deja los alabes del impulsor, tiene su máxima velocidad, presenta cambios de velocidad y de presión, que se evidencian en una bomba centrífuga, así como el patrón de flujo a través de la bomba.

Después que el líquido deja el impulsor entra a la carcaza, donde hay un cambio de área transversal seccional a través de la cual se incrementa el caudal de fluido en sentido del flujo; al pasar por este cambio de área, ocurre un proceso de difusión, originando que la velocidad del líquido disminuya. De acuerdo con la ecuación 10 de Daniel Bernoulli (siglo XXVIII), la disminución de la energía cinética es transformada en energía potencial, dando como resultado que la presión del líquido incremente proporcionalmente a la velocidad disminuya.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (10)$$

Donde:

P = Presión

V = Velocidad

Z = Cota o elevación

$\rho$  = Densidad

### 2.3. Características de las bombas centrífugas

- La principal característica de las bombas centrífugas es su capacidad de convertir la energía producida por un motor, primero en energía cinética y luego en energía de presión
- La eficiencia de las estas bombas es buena. Pero comienza a disminuir a medida que la viscosidad del líquido aumenta.
- Estas bombas poseen la máxima flexibilidad posible, al desarrollar una presión máxima en cualquier condición de operación siempre y cuando el caudal sea controlado.

### 2.4. Componentes de una bomba centrífuga

En la siguiente figura 5 podemos apreciar las partes de una bomba hidráulica, las cuales se enumeran a continuación.

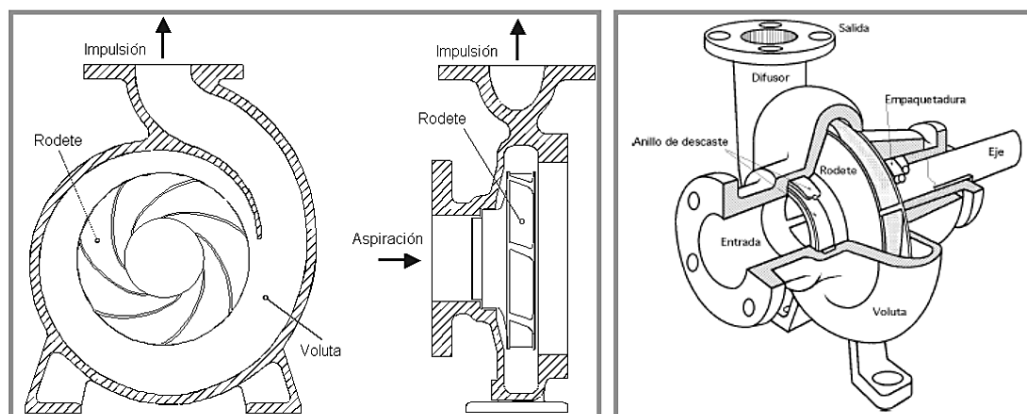


Figura 5. Partes de una bomba centrífuga. Martínez, G. (2016). *Diseño y estudio de una bomba hidráulica centrífuga mediante la generación de su prototipo virtual*. Universidad Politécnica de Valencia.

### 2.4.1. Carcasa o Voluta

Es uno de los elementos más importantes de las bombas centrífugas, la cual podemos apreciar en la figura 6, es la encargada de contener y rodear el impulsor y el rodete. Esta pieza tiene como función dirigir los fluidos bombeados a la boca de salida, convirtiendo la energía cinética en energía potencial debido a la reducción en la velocidad al aumentar el área de flujo. (Karassik, Carter & Berumen, 1966)



Figura 6. Carcasa de bomba centrífuga. Fuente: [www.directindustry.it](http://www.directindustry.it)

### 2.4.2. Rodete

Es el encargado de transferir energía al fluido transmitida por el eje, diseñado para que gire en un sentido de la misma forma de una centrífuga, incrementando en el líquido el componente de la energía cinética.

En este elemento se pueden identificar un cubo o elemento similar a un disco que se enlaza al eje y a los alabes configurando el triángulo de velocidades que define las características de

bombeo y la llanta que cumple la función de ser un canal de flujo con los alabes y los cubos. (Karassik et al., 1966)

El número de alabes y la existencia de la llanta, son factores determinantes, en la identificación del tipo de rodete (Figura 7):

- Cerrados: Están compuestos por los alabes y discos unidos en sus laterales de forma que dirigen el flujo a través de sus paredes. Es el más utilizado para impulsar fluidos limpios, es el impulsor con mayor rendimiento y puede tener problemas de obstrucción.
- Abiertos: No disponen de paredes laterales. Son utilizados para impulsar fluidos que pueden contener impurezas, no tiene problemas de obstrucción, su principal desventaja son los bajos rendimientos hidráulicos (menor eficiencia) por “fugas internas”.
- Semiabiertos: sin problemas de obstrucción, componente híbrido, se emplean con fluidos “sucios”.
- Doble aspiración: compensa esfuerzos axiales, para grandes caudales.



Figura 7. Rodete de bomba centrífuga. Fuente: [www.ingenierocivilinfo.com](http://www.ingenierocivilinfo.com)

### 2.4.3. Eje

Es el elemento del motor de la bomba (Figura 8), que se encarga de girar a la velocidad de diseño, gracias a su acoplamiento al motor. Este transforma la energía eléctrica aportada por el motor, en energía de velocidad cedida al rodete mediante una chaveta que acopla ambas piezas. (Karassik et al., 1966)



*Figura 8.* Imagen de un eje de una bomba. Martínez, G. (2016). *Diseño y estudio de una bomba hidráulica centrífuga mediante la generación de su prototipo virtual.* Universidad Politécnica de Valencia.

### 2.4.4. Anillo de desgaste o aros de cierre

Es un aro que se desgasta (Figura 9), para evitar las fugas internas entre las partes fijas y móviles de la bomba; sin embargo, a pesar de su presencia el caudal de fugas no puede ser cero, siempre se encontrara pequeñas cantidades de escape, lo que genera un rendimiento volumétrico de la bomba. Según la modalidad este tienen distintas nominaciones, aro laberinto, simple y almenados. (Karassik et al., 1966)



*Figura 9. Anillo de desgaste de una bomba centrífuga. Martínez, G. (2016). Diseño y estudio de una bomba hidráulica centrífuga mediante la generación de su prototipo virtual. Universidad Politécnica de Valencia.*

### **2.4.5. Estopa**

Elemento lubricado encargado de evitar fugas exteriores. Se encuentra entre el cuerpo de la bomba, el eje y los prensaestopas. Requiere de ser refrigerado por lo que permite fugas a través de él. (Karassik et al., 1966)

## **2.5. Curvas que modelan el comportamiento de las bombas**

### **2.5.1. Curva característica de una bomba**

Las curvas características de una bomba describen la relación en la caída de presión y el caudal; datos fundamentales en la selección de la bomba adecuada para cada instalación. La altura de cada manometría de una bomba es una magnitud, que se puede expresar también como presión, permitiendo evaluar la energía suministrada al fluido; es decir la caída de presión que debe superar la bomba, para hacer que el fluido tome la energía necesaria para que este circula bajo las condiciones de diseño. (Karassik et al., 1966)

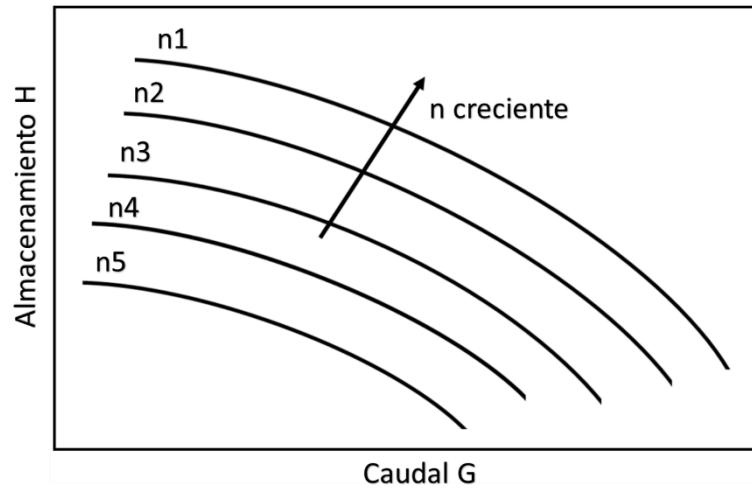


Figura 10. Curvas características de una bomba Fuente: (Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización, 2019)

Como se puede observar en la figura 10, para cada velocidad de rotación, hay una curva característica y que, si la velocidad se reduce, disminuye también la altura manométrica máxima y el caudal máximo.

### 2.5.2. Otras curvas características

El fabricante debe evaluar experimentalmente condiciones en función del caudal, las curvas relativas, para dar una visión más completa del funcionamiento total de la bomba en las diferentes condiciones de instalación. (Karassik et al., 1966)

### 2.5.3. Curva de potencia absorbida caudal:

Estas dependen de las características del trabajo, del caudal y la altura manométrica de la bomba. Es la potencia necesaria para que la bomba haga funcionar el eje

$$P_{bomba} = \frac{\rho * q * \Delta P}{\eta_T} \quad (11)$$

$\rho$  = Densidad

Q= Caudal

$\Delta P$ = Caída de presión en el circuito o altura manométrica

$\eta_T$ = Rendimiento de la bomba

#### 2.5.4. Rendimiento total de la bomba

Al líquido fluir a través de una bomba, solo una parte de la energía transferida al eje impulsor es transmitida al fluido. Existen procesos internos en la bomba que generan pérdidas en la eficiencia de esta, la fricción en los cojinetes, juntas y del fluido, hace que energía se pierda en el proceso. Esta pérdida tiene varios componentes:

#### 2.5.5. Rendimiento mecánico ( $\eta_m$ ):

Cuantifica las pérdidas energéticas, por la fricción de los cojinetes, en las camisas, en los prensaestopas, por el mismo fluido al pasar entre el rodete y el cuerpo de la bomba, a las que se llaman pérdidas de disco; debe existir una potencia que compense estas pérdidas,  $P_m$ . (Karassik et al., 1966)

Por lo tanto:

$$\eta_m = \frac{P_o - P_m}{P_o} \quad (12)$$

$P_o$ = Potencia recibida por la bomba.

### 2.5.6. Rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ ):

Teóricamente una bomba propicia que el caudal circulante es su interior sea mayor que el saliente al exterior o útil para la instalación. Da lugar al estudio de las de pérdidas volumétricas y sus causales son dos, la primera por recirculación interna al pasar una fracción del caudal de la zona de alta presión, salida del rodete, a la zona de baja presión, entrada del rodete. La segunda causa es la fuga al exterior por el orificio del eje. (Karassik et al., 1966)

Tenemos que:

$$Q_l = Q + q_r + q_E \quad (13)$$

$Q_l$  = Caudal de salida de la bomba

$Q$  = Caudal de ingreso de la bomba

$q_r$  = Caudal de recirculación

$q_E$  = Caudal de escape

A partir de esta expresión obtenemos las pérdidas volumétricas de la bomba:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + q_r + q_E} = \frac{Q}{Q_l} \quad (14)$$

### 2.5.7. Rendimiento hidráulico ( $\eta_h$ ):

Es la relación entre la energía del eje de la turbina y la hidráulica absorbida por el rodete.

Este tipo de pérdidas se asocian por rozamiento y cambios de dirección.

$$\eta_h = \frac{H_{tn} - \Delta h_{ch} - \Delta h}{H_{too}} \quad (15)$$

$H_{tn}$  = Altura creada por la bomba para finitos alabes

$\Delta h_{ch}$  = Efecto del choque contra los alabes

$\Delta h$  = Pérdida de carga por circulación interna

$H_{too}$  = Altura creada por la bomba para infinitos alabes

### **3. Principales fenómenos físicos en un sistema hidráulico**

La real academia española define como fenómeno a cualquier cosa que se manifiesta y que puede ser percibido por medio de los sentidos, es decir es una experiencia.

Existen fenómenos físicos, químicos, naturales y biológicos; y dentro de cada uno de ellos hay otros subtipos. En este capítulo abordaremos los fenómenos hidráulicos, mecánicos y térmicos en un sistema hidráulico.

#### **3.1. Fenómenos hidráulicos**

La hidráulica es la rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos en función de sus propiedades específicas. Es decir, estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos.

##### **3.1.1. Fenómeno de cavitación**

Este fenómeno puede afectar a cualquier elemento del sistema hidráulico, a las bombas hidráulicas, las válvulas de presión y las tuberías en general. En las dos primeras suele ocasionar ruido, golpes como si tuviesen piedras dentro chocando y provocar vibraciones. En las tuberías es común la corrosión interna de las paredes debilitando la estructura.

Es una situación indeseable donde se genera gasificación del fluido de trabajo. Las burbujas de dicha gasificación estallan en contacto con la tubería y paredes de otros elementos causando corrosión y desprendimiento de partículas que, además de hacer imposible la impulsión de este, puede llegar a producir daños serios y roturas en las conducciones. Se genera por cambios drásticos en la presión del fluido. (Martín et al., 2011).

### 3.1.2. Cavitación de una bomba

La cavitación es un fenómeno indeseable y evitable que se produce al inicio de la bomba. El fluido al entrar a la bomba es comprimido y las pequeñas burbujas implosionan a nivel molecular, cada una de estas implosiones son más fuertes de lo que pensamos y pueden llegar a remover material interno y erosionar el rodete de la bomba hasta impedir el funcionamiento apropiado de la misma. Esta puede destruir equipo nuevo en minutos, dejando signos de daños físicos incluyendo patrones específicos como lo podemos ver en la figura 11 y disminuir la altura de elevación. (Solorzano, 2016).



*Figura 11.* Daños por cavitación en una bomba de engranajes externos. Fuente: Solorzano, R. (2016, 13 junio). *Cavitación en sistemas hidráulicos. Hydraulics & Pneumatics.* <https://www.hydraulicspneumatics.com/hp-espanol/articulo/21886592/cavitacin-en-un-sistema-hidraulico>.

### **Medidas de control:**

Para prevenir estas causas de cavitación y asegurarnos que diseñamos un sistema con una vida útil larga y productiva, siete elementos deben ser correctamente ejecutados:

1. Diseñar el tanque correctamente
2. Utilizar un filtro de respiradero en el tanque
3. Instalar líneas de succión dimensionadas y configuradas correctamente
4. Remover filtración en la línea de succión
5. Utilizar una bomba correctamente dimensionada
6. Mantener una temperatura adecuada del fluido
7. Utilizar una succión con presión positiva. (Solorzano, 2016)

### **NPSH**

Para evitar la cavitación, hace falta mantener una presión suficiente, por encima de la presión de vapor, en la entrada de la bomba. El valor necesario es calculado por el fabricante como NPSH<sub>r</sub> (Net Positive Suction Head required). Desde el punto de vista de la utilización, hay que asegurar que el NPSH<sub>d</sub> (disponible) en el sistema sea superior al NPSH<sub>r</sub>. (McNaughton, 1992)

$$NPSH_r < NPSH_d \quad (16)$$

La forma de calcular NPSH<sub>d</sub>:

$$NPSH_d = \text{Presión estática} + \text{Presión dinámica} - \text{Presión de vapor} \quad (17)$$

**Presión estática:**

Es la fuerza normal por unidad de área actuando sobre un plano o contorno sólido a un punto dado. Describe la diferencia entre la presión del interior y el exterior de un sistema, despreciando el movimiento del fluido.

**Presión dinámica:**

Es la presión ejercida por un fluido en movimiento, siendo esta más alta que la presión estática debido a la energía cinética. Es medible al convertir la energía cinética en energía potencial.

Tenemos que:

$$NPSH_d = \frac{P_{at}}{\rho g} + \frac{P_s}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (18)$$

Donde:

$P_{at}$  = Presión atmosférica

$\rho$  = Densidad del fluido

$g$  = Fuerza de gravedad

$P_s$  = Presión estática

$V$  = Velocidad del fluido

$P_v$  = Presión de vapor

En el caso que el circuito se encuentre cerrado al exterior, tenemos:

$$NPSH_d = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (19)$$

### **3.1.3. Golpe de ariete**

Siempre hay situaciones donde tienen lugar los denominados flujos transitorios (es decir, en el arranque y parada de bombas de forma voluntaria o involuntaria, por fallos en el suministro eléctrico; apertura y cierre de válvulas), en los cuales se produce una variación del flujo con el tiempo (Martín et al., 2011), este aumento repentino de la presión causado por el cambio rápido en la velocidad de caudal de la tubería se le llama golpe de ariete, es una situación indeseable en la mayoría de los sistemas. Sucede principalmente cuando el fluido de trabajo está a altas temperaturas donde se produce vaporización produciendo una perturbación en el sistema hasta que de nuevo se alcanza el equilibrio del nuevo régimen estacionario. (Grundfos)

Las sobrepresiones generadas en el golpe de ariete pueden ser muy elevadas, y pueden acarrear roturas de válvulas, de conducciones y bombas si no se toman las precauciones adecuadas en el diseño. (Martín et al., 2011)

Este fenómeno se denomina "golpe de ariete" porque los aumentos repentinos de la presión suelen ir acompañados de un ruido semejante al que haría la tubería si se golpease con un martillo. (Grundfos)

### **3.2. Fenómenos mecánicos**

Los fenómenos mecánicos se caracterizan por estar asociados con el equilibrio o el movimiento de los objetos. Un fenómeno mecánico es un tipo de fenómeno físico que involucra las propiedades físicas de la materia y de la energía, es decir, es la acción donde la materia

sufre un cambio de posición en el espacio, en un tiempo determinado, un tipo de velocidad (constante, variable) y una aceleración (constante o variable).

La bomba centrífuga, son también denominada bomba rotodinámica, estas están dotadas principalmente de un elemento móvil: el rotor, rodete, o impulsor, que es el elemento que transfiere la energía que proporciona el motor.

La rotación del rodete alrededor de un eje un fenómeno mecánico en el cual las velocidades en los diferentes puntos del rodete son proporcionales a la distancia al eje.

Por lo que la velocidad de traslación es constante en cada uno de los puntos del rodete por lo que recorrerá una trayectoria rectilínea con velocidad constante y todas sus trayectorias serán paralelas entre sí.

Debido a la depresión que genera el rodete al girar el fluido se verá atraído y entrara por el centro de este, punto 1 de la Figura 12, inmediatamente este entrara en contacto con los álabes que lo llevaran en dirección radial, de forma que a la salida el movimiento del fluido tiene componentes radial y transversal. Desde el punto 1 el flujo empezara a desplazarse, idealmente contorneando los alabes y al mismo tiempo separándose del eje del rodete, a cada instante aumenta su radio moviéndose en el sentido de la rotación por lo que su trayectoria, vista desde el exterior, resultará en una espiral, lo cual resulta en dos diferentes movimientos uno lineal y otro angular, haciendo que bomba desplace la misma cantidad de fluido por cada ciclo de rotación. (De las Heras, 2011)

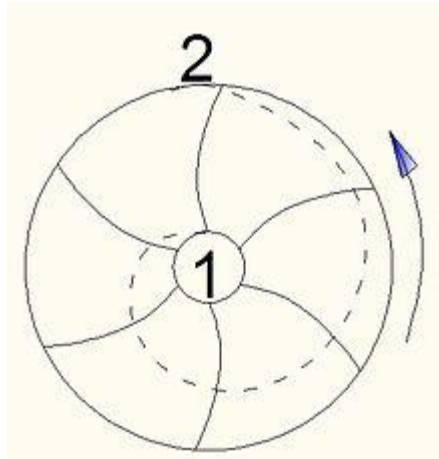


Figura 12. Desplazamiento de una partícula al ingresar por el centro del impulsor de una bomba centrífuga.

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba\\_centric%C3%ADfuga#/media/Archivo:Bombcentr.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Bomba_centric%C3%ADfuga#/media/Archivo:Bombcentr.jpg)

En las líneas de flujo en forma espiral el vector velocidad forma un ángulo constante a lo largo de estas y el conjunto de líneas de espiras forman un vórtice libre con una fuente puntual, como el que se muestra en la Figura 13, por lo que las velocidades son inversamente proporcionales a los radios de los círculos. (De las Heras, 2011)

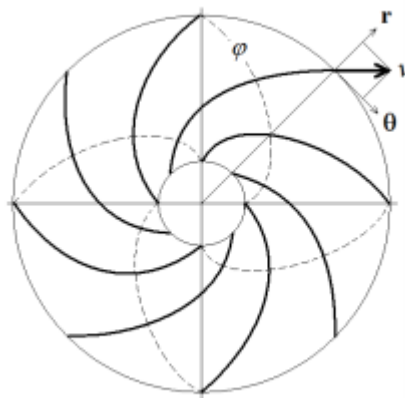


Figura 13. Vórtice libre con una fuente puntual. Fuente: De las Heras, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas* (Primera edición ed.). Universidad Politécnica de Cataluña.

### 3.3. Fenómenos térmicos

Los fenómenos térmicos son aquellos que están relacionados con la emisión y la absorción del calor. Una característica general de los fenómenos térmicos es que existen cuerpos que ceden energía en forma de calor, y otros que son capaces de absorber dicha energía. Con el objetivo de caracterizar cuantitativamente la emisión o la absorción del calor, se ha establecido el concepto cantidad de calor.

Uno de los mayores problemas que se tiene cuando se transporta un fluido a través de una tubería de acero u otro material es la pérdida de calor la cual representa pérdida de energía y por lo tanto de dinero.

La ley física que describe matemáticamente el mecanismo de transferencia de calor por conducción es la Ley de Fourier (Figura 14). Se considera que el calor fluirá a través de un medio cuyas moléculas están fijas en sus posiciones, es decir un medio sólido. (Pardo & Rodríguez, 2005)

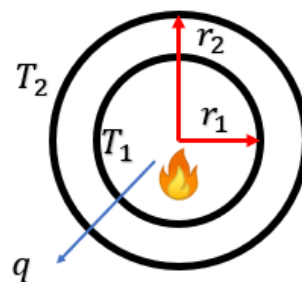


Figura 14. Ley de Fourier en una tubería. Fuente: Autor.

Ley de Fourier para la transferencia de calor en una tubería donde  $T_1 > T_2$

$$q = \frac{2\pi K(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (21)$$

$K$ = coeficiente de conductividad térmica del material.

Cuando la diferencia de temperaturas entre un cuerpo y su medio ambiente no es muy grande, el calor transferido en la unidad de tiempo hacia el cuerpo o desde el cuerpo es aproximadamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el medio externo. (Pardo & Rodrigue, 2005)

## 4. Modelos matemáticos para un sistema de flujo monofásico

### 4.1. Ecuación de continuidad

El método de cálculo de la velocidad de flujo en un sistema de ductos cerrados depende *del principio de continuidad*. Considere el conducto de la Figura 15. un fluido circula con un flujo volumétrico constante de la sección 1 a la 2. Es decir, la cantidad de fluido que circula a través de cualquier sección en cierta cantidad de tiempo es constante. Esto se conoce como *flujo estable*. Por ello, si entre las secciones 1 y 2 no se agrega fluido ni se almacena o se retira, la masa del fluido que circula por la sección 2 es cierta cantidad de tiempo debe ser similar a la que circula por la sección 1. (Mott, 2006)

$$M_1 = M_2 \quad (22)$$

O bien, debido a que  $M = \rho Av$ , tenemos

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (23)$$

$$\text{Flujo volumétrico es igual a: } Q = Av \quad (24)$$

Entonces,

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (25)$$

La anterior ecuación es el enunciado matemático del principio de continuidad y se le denomina ecuación de continuidad. Se utiliza para relacionar la densidad del fluido, el área de

flujo y la velocidad de este en dos secciones del sistema donde existe un flujo estable. (Mott, 2006)

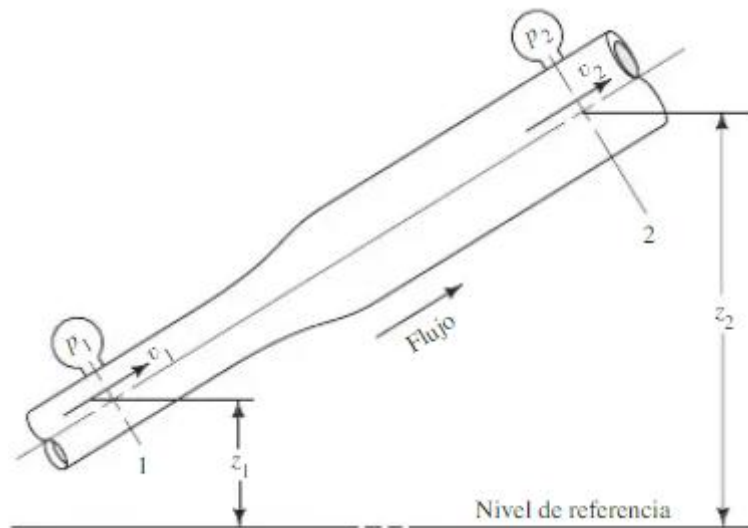


Figura 15. Principio de continuidad. Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (sexta ed.). México: Pearson Educación.

#### 4.2. Conservación de la energía ecuación de Bernoulli

Según el enunciado de la ley de la *conservación de la energía*, la energía no se crea ni se destruye solo se transforma.

Hay tres tipos de energía que se toman siempre en consideración cuando se analiza un problema de flujo en tuberías. Considere un elemento de fluido como el que se muestra en la Figura 16. se localiza a cierta elevación  $z$ , tiene velocidad  $v$  y presión  $P$ . (Mott, 2006)

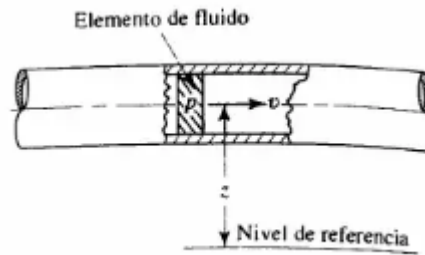


Figura 16. Elemento de flujo. Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (sexta ed.). México: Pearson Educación.

Tipos de energía:

Energía potencial: Debido a su elevación, la energía potencial del elemento en relación con algún nivel de referencia es

$$EP = wz \quad (26)$$

Donde  $w$  es el peso del elemento.

Energía cinética: Debido a su velocidad

$$EC = \frac{wv^2}{2g} \quad (27)$$

Energía de flujo: A veces llamada energía de presión o trabajo de flujo y representa la cantidad de trabajo necesario para mover el fluido a través de cierta sección contra la presión  $P$ . (Mott, 2006)

$$EF = \frac{wP}{\gamma} \quad (28)$$

Donde  $\gamma$  es el peso específico  $\gamma = \frac{mg}{v}$  (29)

Entonces:

$$E = EF + EP + EC \quad (30)$$

$$E = \frac{wP}{\gamma} + wz + \frac{wv^2}{2g} \quad (31)$$

Considere el elemento de la Figura 17, que se mueve de la sección 1 a la 2. Los valores de  $P$ ,  $z$  y  $v$  son diferentes en las secciones. (Mott, 2006)

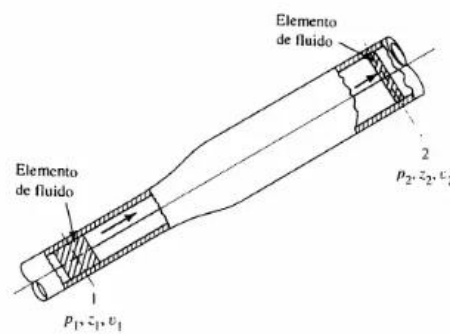


Figura 17. Flujo a través de una tubería. Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (sexta ed.). México: Pearson Educación.

En la sección 1 la energía es:

$$E_1 = \frac{wP_1}{\gamma} + wz + \frac{wv_1^2}{2g} \quad (32)$$

Y en la sección la energía es:

$$E_2 = \frac{wP_2}{\gamma} + wz + \frac{wv_2^2}{2g} \quad (33)$$

Por el principio de conservación de energía si no hay energía que se agregue o pierda entonces:

$$E_1 = E_2 \quad (34)$$

$$\frac{wP_1}{\gamma} + wz + \frac{wv_1^2}{2g} = \frac{wP_2}{\gamma} + wz + \frac{wv_2^2}{2g} \quad (35)$$

El peso es común de todos los términos por lo que se puede eliminar

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (36)$$

Y esta expresión se le conoce como ecuación de Bernoulli. Ec.36. (Mott, 2006)

Restricciones de la ecuación de Bernoulli:

- Es válida solo para fluidos incompresibles.
- No puede haber dispositivos mecánicos que agreguen o retiren energía el sistema entre las secciones de interés.
- No puede haber transferencia de calor hacia el fluido o fuera de este.
- No puede haber pérdidas de energía debido a la fricción.

### 4.3. Ecuación de Darcy-Weisbach

Ecuación general de la energía es la extensión de la ecuación de Bernoulli, lo que posibilita resolver problemas en los que hay pérdida y ganancia de energía.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_f = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (37)$$

Donde:

$h_A$ = Energía que se agrega al fluido con un dispositivo mecánico, como una bomba.

$h_R$ = Energía que se remueve del fluido por medio de un dispositivo mecánico, como un motor de fluido.

$h_f$ = Pérdidas de energía del sistema por la fricción en las tuberías o válvulas y otros accesorios.

$$h_f = K \frac{v^2}{2g} \quad (38)$$

Donde  $K$  es el coeficiente de resistencia. (Mott, 2006)

**Fricción del fluido:** un fluido en movimiento presenta resistencia por fricción a fluir. Parte de la energía del sistema se convierte en energía térmica, que se disipa a través de las paredes de la tubería. La magnitud de la energía que se pierde depende de las propiedades del fluido, velocidad de flujo, tamaño de la tubería, acabado de la pared de la tubería y longitud de esta. (Mott, 2006)

**Válvulas y accesorios:** Es común que los elementos que controlan la dirección del fluido en un sistema generen turbulencia local en éste, lo que ocasione que la energía se disipe en calor. (Mott, 2006)

#### 4.4. Número de Reynolds

El comportamiento de un fluido, en lo que se refiere a pérdidas de energía, depende del flujo sea laminar, turbulento o transitorio.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{v\rho D}{\mu} \quad (39)$$

$v$  = velocidad de flujo ft/s

$\rho$  = densidad del fluido lb/ft<sup>3</sup>

$\mu$  = viscosidad dinámica lb\*s/ft<sup>2</sup>

$D$  = diámetro ft

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido a la fuerza viscosa (Ec.39). Los números Reynolds grandes debido a una velocidad elevada y/o una viscosidad baja y tienden a ser turbulentos. Los flujos que tienen una alta viscosidad y/o se mueve a velocidades bajas se comportaran de forma laminar. (Mott, 2006)

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| Reynolds < 2000      | Laminar     |
| Reynolds 2000 – 4000 | Transitorio |
| Reynolds > 4000      | Turbulento  |

#### 4.5. Pérdida por fricción en el flujo laminar

Cuando existe flujo laminar parece moverse como si fueran varias capas, una sobre la otra. Por la viscosidad del fluido se crea un esfuerzo entre sus capas. Se pierde energía del fluido por la acción de las fuerzas de fricción que hay que vencer. Existe una relación que se conoce como ecuación de Hagen-Poiseulle (Ec.40) que estas pérdidas. (Mott, 2006)

$$h_L = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2} \quad (40)$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad cinemática  $ft^2/s$

Pero también se puede usar la ecuación de Darcy Ec.38 para calcular la pérdida por fricción para el flujo laminar, igualamos la ecuación de Darcy con la ecuación de Hagen-Poiseulle Ec.41.

$$h_L = f \frac{L v^2}{2gD} = \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2} \quad (41)$$

$$f = \frac{2gD}{Lv^2} * \frac{32\eta Lv}{\gamma D^2} = \frac{64\eta g}{vD\gamma} \quad (42)$$

Donde:  $\rho = \frac{\gamma}{g}$  (43)

$$f = \frac{64\eta}{vD\gamma} = \frac{64}{Re} \quad (44)$$

#### 4.6. Pérdidas de fricción en el flujo turbulento

Cuando hay flujo turbulento es conveniente usar la ecuación de Darcy para calcular la pérdida de energía debido a fricción. El flujo turbulento es caótico y varia de forma constante.

La siguiente ecuación (Ec.45) fue desarrollada por P.K. Swamee y A.K. Jain. (Mott, 2006)

$$f = \frac{0,25}{\left( \ln \left( \frac{1}{3,7 * \frac{1}{ER}} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)^2} \quad (45)$$

Donde ER es la rugosidad relativa de la tubería.

#### 4.7. Pérdidas de fricción en flujo transitorio

El régimen transitorio que tiene lugar cuando se produce una variación brusca en la velocidad del fluido. La ecuación de Blasius (Ec.46) propone una expresión para el factor de fricción en este régimen. (Mott, 2006)

$$f_m = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \quad (46)$$

#### 4.8. Diagrama de Moody

El diagrama de Moody (Figura 18) es uno de los métodos más utilizados para evaluar el factor de fricción  $f$ . Este diagrama muestra el factor de fricción en función del número de Reynolds, con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa. (Mott, 2006)

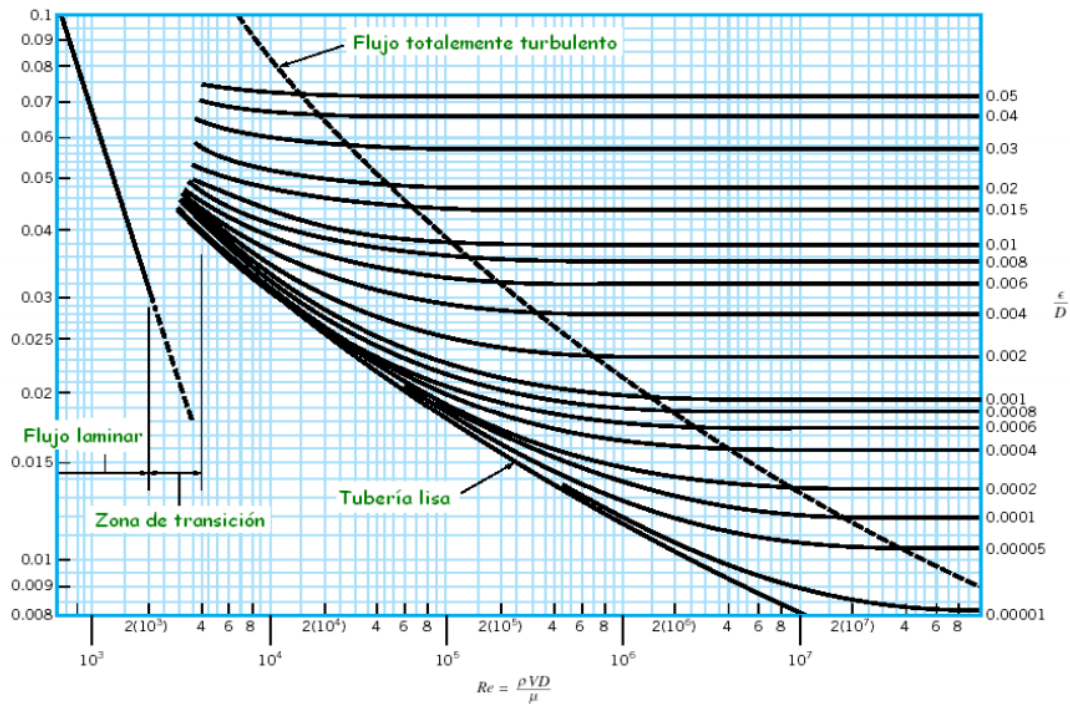


Figura 18. Diagrama de Moody. Fuente: <https://avdiaz.files.wordpress.com/2008/10/presentacion1.pdf>

Para conocer la rugosidad relativa depende del diámetro de la tubería y del material de esta, para conocer este dato utilizamos la gráfica (Figura 19) tomada del libro de Crane.

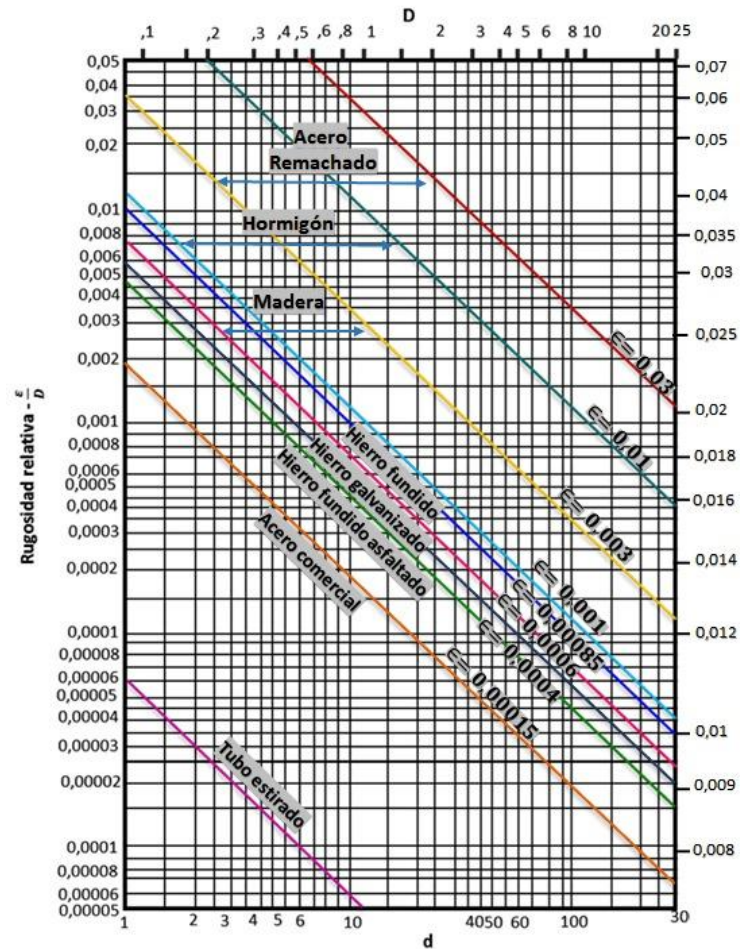


Figura 19. Gráfica rugosidad relativa. Tomada y modificada del libro de Crane (1989). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.*

#### 4.9. Pérdidas por fricción en válvulas y accesorios.

Cuando el líquido fluye a través de válvulas, codos, tes, acoples entre otros accesorios existen ciertas pérdidas por fricción, para calcular estas pérdidas pueden ser calculadas según la ecuación de Darcy, Ec. 47.

$$h_f = K \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (47)$$

Donde:

$h_f$  = es el valor de las pérdidas debido al accesorio.

$K$  = constante dependiendo del tipo de accesorio (codo, te, acople, reducción, etc.).

$V$  = Velocidad.

$g$  = aceleración debido a la gravedad. (McNaughton, 1992)

Los de  $K$  más comunes para válvulas, codos, reducciones entre otros accesorios se presentarán a continuación de las Figuras 20 y 21, junto con la fuente de las fórmulas y los coeficientes de fricción  $f_T$  se encuentran en la Tabla 1.

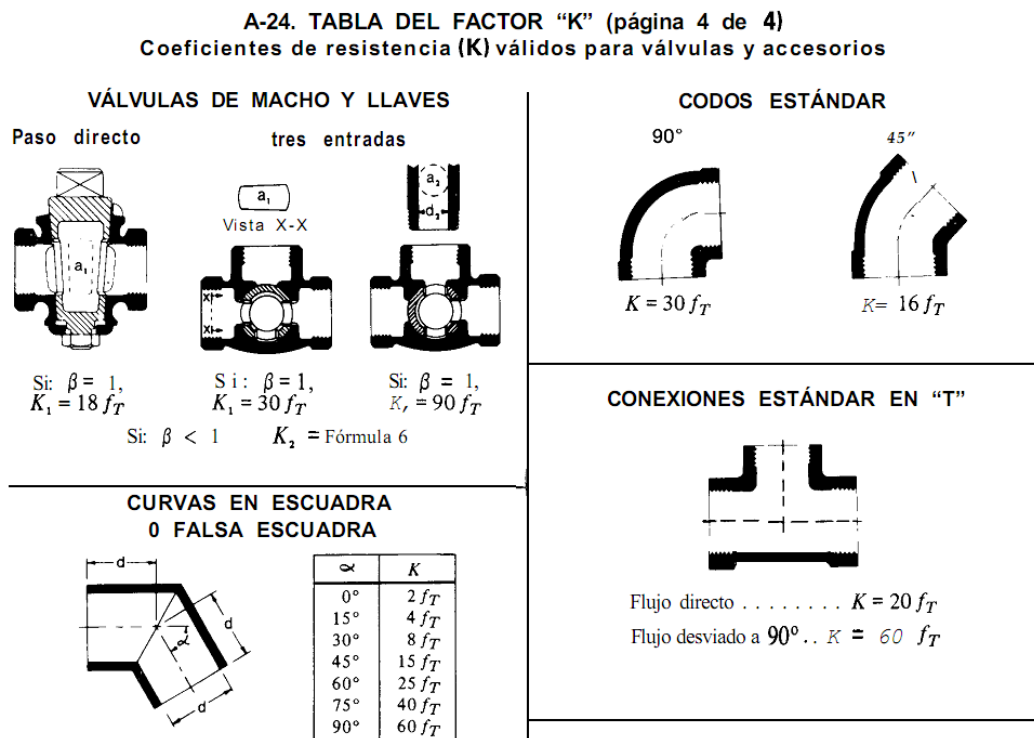


Figura 20. Fórmulas para hallar la constante K de los accesorios más comunes, se tomaron en el libro de Crane (1989). *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.*

"K" FACTOR TABLE—SHEET 2 of 4  
**Representative Resistance Coefficients (K) for Valves and Fittings**  
 (for formulas and friction data, see page A-26)

("K" is based on use of schedule pipe as listed on page 2-10)

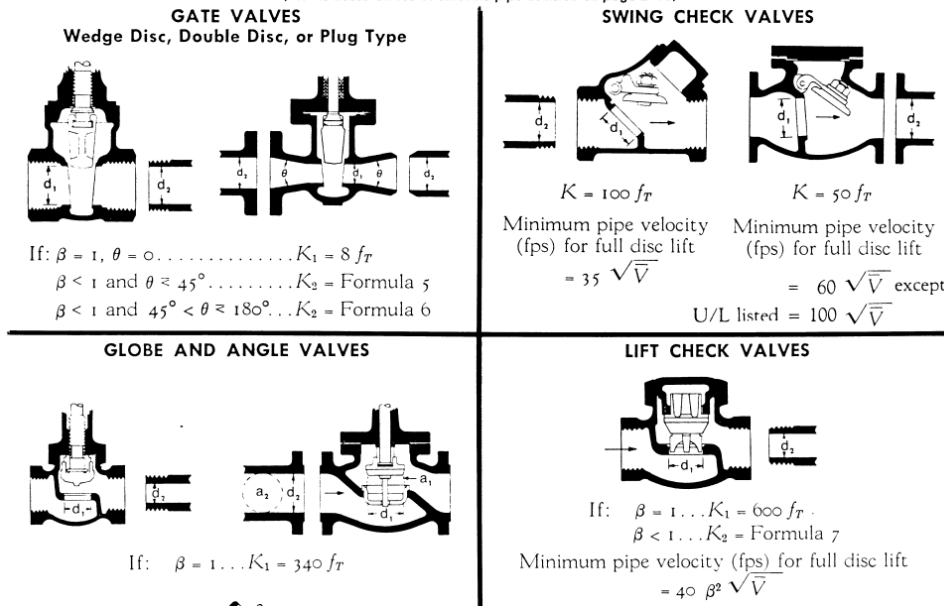


Figura 21. Fórmulas para hallar la constante K las válvulas más comunes, se tomaron en el libro de Crane (1989). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.

Tabla 1.

Coefficiente de fricción  $f_T$

**A-24. TABLA DEL FACTOR "K" (página 1 de 4)**  
**Coefficientes de resistencia (K) válidos para válvulas y accesorios**  
 ("K" está basado en el uso de las tuberías cuyos números de cédula se dan en la página 2-10)

**FACTORES DE FRICCIÓN PARA TUBERÍAS COMERCIALES, NUEVAS, DE ACERO, CON FLUJO EN LA ZONA DE TOTAL TURBULENCIA**

| Diámetro mm                  | 15   | 20   | 25   | 32   | 40   | 50   | 65, 80 | 100  | 125  | 150  | 200,250 | 300,400 | 450-600 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|--------|------|------|------|---------|---------|---------|
| Nominal pulg                 | ½    | ¾    | 1    | 1¼   | 1½   | 2    | 2½, 3  | 4    | 5    | 6    | 8: 10   | 12-16   | 18-24   |
| Factor de fricción ( $f_T$ ) | .027 | .025 | .023 | .022 | .021 | .019 | .018   | .017 | .016 | .015 | .014    | .013    | .012    |

Nota: La anterior tabla es del libro de Crane (1989). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.

**4.10. Características de funcionamiento de una bomba**

Existen dos cosas muy importantes que se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar una bomba centrífuga para determinada operación, la primera es la capacidad que se desea, es

decir, el caudal (GPM) y la carga hidráulica a la cual será sometida dicha bomba mientras entrega el flujo deseado.

La carga hidráulica corresponderá a la altura de elevación, la cual no es más que la suma de la energía cinética y potencial del fluido con el fin de transportarlo de un lugar a otro, esta energía se produce en respuesta al trabajo necesario para transportar el líquido a través de una tubería hacia un nivel más alto.

La altura de elevación del sistema es la altura a la cual se desea llevar el fluido, mediante el uso de una bomba centrífuga. También se denomina carga total de la bomba, esta carga está compuesta por cinco cargas distintas que serán explicadas a continuación. (Pérez, 2016)

#### 4.11. Carga estática de la bomba.

La carga estática de la bomba está definida entre la superficie de succión y la superficie de descarga como se muestra en la Figura 22.

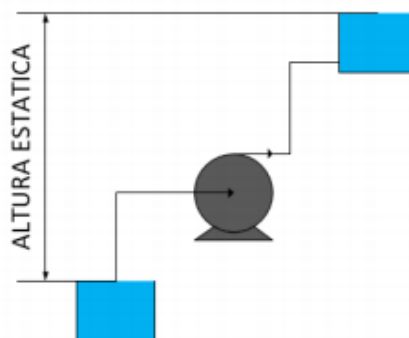


Figura 22. Carga estática. Pérez, L. (2016). *Desarrollo e implementación de un software de selección de bombas centrífugas para la empresa mantenimiento técnicos integrados Ltda.* Universidad Industrial de Santander.

La carga total de una bomba centrífuga es la energía suministrada al líquido por la bomba, es decir, la diferencia entre la carga de succión y la carga de descarga, surgiendo así la ecuación de Bernoulli. (McNaughton, 1992)

#### 4.12. Potencia que requieren las bombas

La potencia se define como la rapidez con que se transfiere la energía. La potencia se calcula con la multiplicación de la energía transferida del fluido por el flujo en peso. (Mott, 2006)

$$P_A = h_A \gamma Q$$

$P_A$  = Potencia que se le agrega al fluido

$\gamma$  = Peso específico del fluido

El termino eficiencia se utiliza para denotar la relación de la potencia transmitida por la bomba al fluido sobre la potencia de entrada a la bomba. (Mott, 2006)

$$E = \frac{\text{Potencia transmitida al fluido}}{\text{Potencia de entrada a la bomba}}$$

Para calcular la potencia de la bomba proporcionada al fluido se hace con la siguiente ecuación (McAllister, 2009):

$$BHP = \frac{Q \Delta P}{1715E} (hp)$$

## 5. Metodología de cálculo

### 5.1. Metodología de cálculo módulo de tuberías

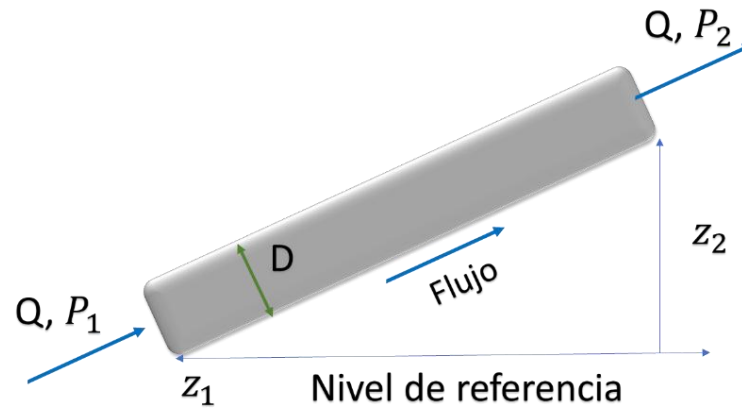


Figura 23. Tubería. Fuente: Autor.

Tomando en cuenta una tubería, sin ningún tipo de accesorios sobre ella, la cual puede ser horizontal, vertical o tener una inclinación como la mostrada en la Figura 23 y utilizando las fórmulas que se vieron en el capítulo anterior modelo matemáticos que fueron tomadas del libro de Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. Se sigue el siguiente procedimiento para encontrar la presión de salida de la tubería y las pérdidas por fricción.

1. Primero debemos conocer la presión ( $P_1$ ) psi y el caudal ( $Q$ ) en GPM que entran en el sistema, también debemos conocer la densidad ( $\rho$ )  $\text{ln/ft}^3$  y la viscosidad del fluido en  $\text{cp}$  ( $\mu$ ).
2. Tenemos una tubería por la cual va a ser transportado el fluido, de la cual debemos conocer su longitud ( $L$ ) en in, si hay diferencia de altura ( $Z$ ) entre la salida y la entrada (ft), y el diámetro interno ( $D$ ) en in.

3. El objetivo es calcular la presión de salida de la tubería ( $P_2$ ), esto se hace mediante la ecuación de Bernoulli Ec.1:

$$P_2 = \frac{\rho}{144} \left[ z_1 + \frac{144P_1}{\rho} - h_f - z_2 \right] \text{ (psi)} \quad (1)$$

Donde  $h_f$  (Ec.1) son las pérdidas por fricción en la tubería.

4. Hallar  $h_f$

$$h_f = 0.00259 \frac{f_m L Q^2}{D^5} \text{ (ft)} \quad (2)$$

Donde  $f_m$  (Ec. 3 a la Ec.5) es el factor de fricción este depende del tipo de flujo que tengamos ya sea turbulento o laminar y se puede hallar con las dos expresiones siguientes o usando el diagrama de Moody figura 23.

$$f_m = \frac{64}{Re} \text{ Laminar} \quad (3)$$

$$f_m = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \text{ Transitorio} \quad (4)$$

$$f_m = \frac{0,25}{\left( \ln \left( \frac{1}{3,7 * \frac{1}{ER}} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)^2} \text{ Turbulento} \quad (5)$$

Antes de calcular el factor de fricción  $f_m$  debemos calcular el número de Reynold con la siguiente expresión (Ec.6):

$$Re = \frac{50,6Q\rho}{D\mu} \quad (6)$$

Conocemos todos los datos por lo que podemos saber en qué régimen de flujo se encuentra nuestro fluido.

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| Reynolds < 2000      | Laminar     |
| Reynolds 2000 – 4000 | Transitorio |
| Reynolds > 4000      | Turbulento  |

Conociendo el régimen podemos hallar el factor de fricción  $f_m$  si el flujo es laminar o transitorio podemos usar la formula Ec.3 o la Ec.4 o usar el diagrama de Moody directamente.

Diagrama de Moody (Figura 18) Flujo laminar: En el eje x tenemos los valores de Reynolds, buscamos el que corresponda con nuestro ejercicio y pasamos una línea perpendicular al eje x donde se corte con la línea de flujo laminar y en este punto trazamos una línea perpendicular al eje y y donde corte tendremos nuestro dato de factor de fricción  $f_m$ .

En el caso que el flujo sea turbulento se procede a calcular la rugosidad relativa de la tubería (ER) con la gráfica (Figura 19).

Gráfica de rugosidad relativa (Figura 19): entro con el diámetro de la tubería (eje x) trazo una línea perpendicular al eje x que hasta que corte con la línea de acero comercial en este punto trazo una línea al eje y donde puedo ver la rugosidad relativa.

Como ya conocemos la rugosidad relativa y el Reynolds podemos hallar el factor de fricción  $f_m$ , por la gráfica de Moody o por la formula (Ec.5).

Gráfica de Moody flujo turbulento (Figura 18): En el eje x tenemos los valores de Reynolds, buscamos el que corresponda con nuestro ejercicio y pasamos una línea perpendicular al eje x, en el lateral derecho tenemos los valores de rugosidad relativa de la tubería que hallamos anteriormente por lo que elegimos la línea que sea más cercana a nuestro valor y procedemos a ver dónde se cruza con la línea perpendicular anteriormente trazada en este punto trazamos una línea perpendicular al eje y y donde corte en el lateral izquierdo tendremos nuestro factor de fricción  $f_m$ .

Al finalizar los pasos anteriores tendríamos todos los datos necesarios para hallar las pérdidas por fricción en la tubería  $h_f$  (Ec.2).

5. Ya halladas las pérdidas en tubería  $h_f$  podemos volver a la ecuación del Bernoulli (Ec.1) y hallar la presión de salida de la tubería  $P_2$ .

## 5.2. Metodología de cálculo módulo de accesorios

El cálculo de pérdidas por accesorios se hace con base en las fórmulas de pérdidas del libro de Crane (1989) Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, al igual que las tablas para hallar la constante K de los accesorios.

Necesitamos conocer el caudal, el diámetro y el tipo de accesorio, la Ec.1 es la ecuación de pérdidas menores en accesorios.

$$h_m = 0.00259K \frac{Q^2}{D^4} (ft) \quad (1)$$

Donde K es el coeficiente de resistencia para válvulas y accesorios. Las ecuaciones para hallar K se encuentran en las Figuras 20 y 21, donde  $f_T$  es el factor de fricción de tuberías de acero valido para válvulas y accesorios que se encuentra en la Tabla 1.

Si se quiere conocer la presión que sale del accesorio, se puede utilizar la ecuación de Bernoulli eliminando los términos de energía potencial Ec.2, ya que no hay una diferencia de altura.

$$P_2 = \frac{\rho}{144} \left[ \frac{144P_1}{\rho} - h_m \right] (psi) \quad (2)$$

## 5.3. Metodología de cálculo módulo de bomba

Para el cálculo de la potencia proporcionada a un fluido se calcula con la siguiente ecuación tomada del libro de McAllister, 2009.

$$BHP = \frac{Q\Delta P}{1715E} \text{ (hp)} \quad (1)$$

Donde E es la eficiencia de la bomba que se puede expresar de la siguiente forma:

$$E = \frac{\text{Potencia transmitida al fluido}}{\text{Potencia de entrada a la bomba}}$$

#### 5.4. Metodología de cálculo módulo de tanques

El módulo de tanques calcula la capacidad de un tanque comercial con respecto al caudal y el tiempo de almacenamiento de este.

Este cálculo se hace por medio de análisis direccional Ec.1.

$$\text{Capacidad} = Q(\text{GPM}) * \frac{1 \text{ Bb}}{42 \text{ Galones}} * \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ día}} * N^{\circ} \text{días} \quad (1)$$

Con la capacidad hallada en barriles se va a la Tabla 2 de dimensionamientos de tanques de la compañía de Pemex para tanques atmosféricos que a su vez está basado en la norma API STD 650, se compara con los valores de capacidad comerciales y se elige el tanque con una capacidad cercana por encima a la obtenida, así podemos leer las dimensiones de un tanque atmosférico comercial.

Tabla 2.

*Dimensionamiento de tanques.*

|   |                               |  |
|---|-------------------------------|--|
| <br><b>DCIDP</b><br><b>SUBDIRECCIÓN DE INGENIERÍA</b><br><b>GERENCIA DE NORMATIVIDAD TÉCNICA</b> | <b>ESPECIFICACIÓN TÉCNICA</b> | <b>No de Documento:</b><br><b>GNT-SSNP-M001-2005</b> |
|   | <b>TANQUES ATMOSFÉRICOS</b>   | <b>REVISIÓN: 0</b><br><b>PÁGINA 20 DE 20</b>         |

**ANEXO 3****DIMENSIONES DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO ATMOSFÉRICOS**

| <b>CAPACIDAD</b><br>Barriles<br>(Metros cúbicos) | <b>DIÁMETRO</b><br>Metros<br>(Pies) | <b>ALTURA</b><br>Metros<br>(Pies) |
|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>1000</b><br>(159)                             | <b>6.096</b><br>(20)                | <b>5.486</b><br>(18)              |
| <b>2000</b><br>(318)                             | <b>7.468</b><br>(24.5)              | <b>7.315</b><br>(24)              |
| <b>3,000</b><br>(477)                            | <b>9.144</b><br>(30.00)             | <b>7.315</b><br>(24.00)           |
| <b>5,000</b><br>(795)                            | <b>9.652</b><br>(31.66)             | <b>10.973</b><br>(36.00)          |
| <b>10,000</b><br>(1,590)                         | <b>12.954</b><br>(42.50)            | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>15,000</b><br>(2,385)                         | <b>17.678</b><br>(58.00)            | <b>9.754</b><br>(32.00)           |
| <b>20,000</b><br>(3,180)                         | <b>18.288</b><br>(60.00)            | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>30,000</b><br>(4,770)                         | <b>22.352</b><br>(73.33)            | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>40,000</b><br>(6,360)                         | <b>25.908</b><br>(85)               | <b>12.192</b><br>(40)             |
| <b>55,000</b><br>(8,745)                         | <b>30.480</b><br>(100.00)           | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>80,000</b><br>(12,720)                        | <b>36.576</b><br>(120.00)           | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>100,000</b><br>(15,900)                       | <b>40.843</b><br>(134.00)           | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>150,000</b><br>(23,850)                       | <b>45.720</b><br>(150.00)           | <b>14.630</b><br>(48.00)          |
| <b>200,000</b><br>(31,800)                       | <b>54.864</b><br>(180.00)           | <b>14.630</b><br>(48.00)          |
| <b>500,000</b><br>(79,500)                       | <b>85.344</b><br>(280.00)           | <b>14.630</b><br>(48.00)          |

Nota: La tabla anterior fue tomada de un documento perteneciente a la compañía PEMEX sobre el diseño de tanques atmosféricos.

### 5.5. Metodología de módulo sistema hidráulico

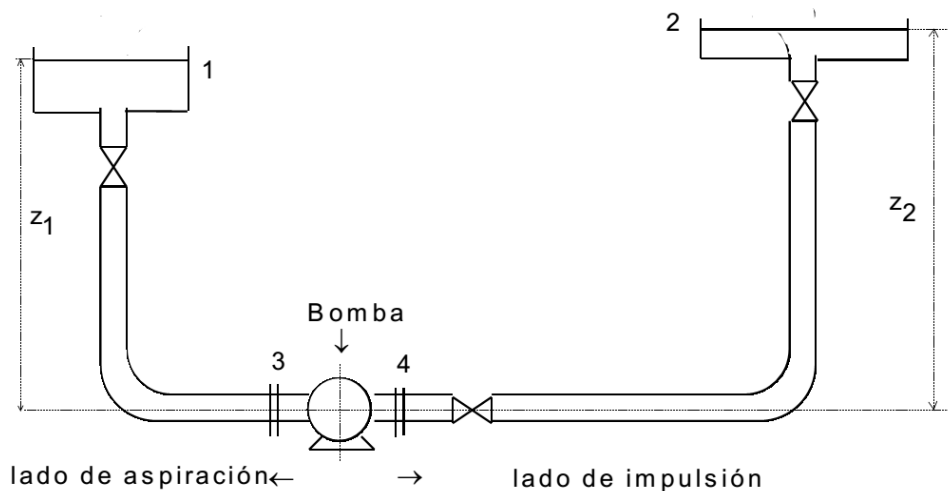


Figura 24. Sistema hidráulico típico. Martín, I., Salcedo, R., & Fort, R. (2011). *Mecánica de fluidos Tema2. Impulsión de fluidos*. Universidad de Alicante. p.4.

Tomando como ejemplo un sistema hidráulico tipo como el mostrado en la Figura 24, se realiza el siguiente procedimiento para hallar las pérdidas en el sistema y la potencia requerida de la bomba, las fórmulas utilizadas se vieron en el capítulo anterior modelo matemáticos que fueron tomadas del libro de Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*.

1. Primero debemos conocer la presión ( $P_1$ ) psi y el caudal ( $Q$ ) en GPM que entran en el sistema, también debemos conocer la densidad ( $\rho$ )  $\text{ln/ft}^3$  y la viscosidad del fluido en  $\text{cp}$  ( $\mu$ ).
2. Tenemos una tubería por la cual va a ser transportado el fluido, de la cual debemos conocer su longitud ( $L$ ) en in, si hay algún accesorio en ella, si hay diferencia de altura ( $Z$ ) entre la salida y la entrada (ft), y el diámetro interno ( $D$ ) en in.

3. El objetivo es calcular la presión de salida de la tubería ( $P_2$ ), esto se hace mediante la ecuación de Bernoulli Ec.1:

$$P_s = P_2 = \frac{\rho}{144} \left[ z_1 + \frac{144P_1}{\rho} - h_L - z_2 \right] \text{ (psi)} \quad (1)$$

Donde  $h_L$  (Ec.2) son las pérdidas de energía, la cual se compone de las pérdidas por fricción en la tubería  $h_f$  (Ec.3) y las pérdidas menores (accesorios)  $h_m$  (Ec.7).

$$h_L = h_f + h_m \text{ (ft)} \quad (2)$$

4. Hallar  $h_f$

$$h_f = 0.00259 \frac{f_m L Q^2}{D^5} \text{ (ft)} \quad (3)$$

Donde  $f_m$  (Ec. 4 y Ec.5) es el factor de fricción este depende del tipo de flujo que tengamos ya sea turbulento o laminar y se puede hallar con las dos expresiones siguientes o usando el diagrama de Moody (Figura 18).

$$f_m = \frac{64}{Re} \text{ Laminar} \quad (4)$$

$$f_m = \frac{0,316}{Re^{1/4}} \text{ Transitorio} \quad (5)$$

$$f_m = \frac{0,25}{\left( \ln \left( \frac{1}{3,7 * \frac{1}{ER}} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right)^2} \text{ Turbulento} \quad (6)$$

Antes de calcular el factor de fricción  $f_m$  debemos calcular el número de Reynold con la siguiente expresión (Ec.7):

$$Re = \frac{50,6Q\rho}{D\mu} \quad (7)$$

Conocemos todos los datos por lo que podemos saber en qué régimen de flujo se encuentra nuestro fluido.

|                      |             |
|----------------------|-------------|
| Reynolds < 2000      | Laminar     |
| Reynolds 2000 – 4000 | Transitorio |
| Reynolds > 4000      | Turbulento  |

Conociendo el régimen podemos hallar el factor de fricción  $f_m$  si el flujo es laminar o transitorio podemos usar la formula Ec.5 o la Ec.6 respectivamente o el diagrama de Moody (Figura 18).

En el caso que el flujo sea turbulento se procede a calcular la rugosidad relativa de la tubería (ER) con la siguiente gráfica (Figura 19).

Como ya conocemos la rugosidad relativa y el Reynolds podemos hallar el factor de fricción  $f_m$ , por la gráfica de Moody (Figura 18) o por la formula (Ec.6).

Al finalizar los pasos anteriores tendríamos todos los datos necesarios para hallar las pérdidas por fricción en la tubería  $h_f$  (Ec.2).

5. En el caso de que haya accesorios en la tubería como codos o válvulas, tenemos que calcular las pérdidas causadas por estas con la siguiente formula (Ec.8).

$$h_m = 0.00259K \frac{Q^2}{D^4} (ft) \quad (8)$$

Donde K es el coeficiente de resistencia para válvulas y accesorios. Las ecuaciones para hallar K se encuentran en las Figuras 20 y 21, donde  $f_T$  es el factor de fricción de tuberías de acero valido para válvulas y accesorios que se encuentra en la Tabla 1.

Si tenemos más de un accesorio las pérdidas por fricción se suman para dar el total de pérdidas menores.

Ya halladas las pérdidas menores  $h_m$  y las pérdidas en tubería  $h_f$  tenemos las pérdidas totales  $h_L$  por lo que podemos volver a la ecuación del Bernoulli y hallar la presión de salida de la tubería  $P_2$  esta será nuestra presión de entrada de la bomba, presión de succión o aspiración  $P_s$ .

6. Repetimos el procedimiento anterior para el otro lado del sistema (impulsión o descarga) con los datos que le corresponde a este extremo.
7. Cuando tengamos la presión de succión y de descarga lo único que falta por hacer es hallar la potencia de la bomba (Ec.8).

$$BHP = \frac{Q\Delta P}{1715E} (hp) \quad (8)$$

Donde E es la eficiencia de la bomba en decimales.

## **6. Software pedagógico HYDRA**

Hydra, es un software pedagógico que permite el diseño y construcción de bombas, líneas y accesorios en superficie, permitiendo cumplir con los requerimientos de caudal y velocidad de los fluidos a través de las tuberías, este software puede ser implementado en la asignatura de facilidades de superficie en el programa de pregrado de ingeniería de petróleos que ofrece la Universidad Industrial de Santander.

### **6.1. Lenguaje de programación PHP**

HYDRA es un software pedagógico que se encuentra diseñado y creado en lenguaje PHP (acrónimo recursivo de PHP: Hypertext Preprocessor). Es un lenguaje de programación de código abierto, empleado para creación de softwares, desarrollo web y que puede ser incrustado en HTML. (Ryte, 2020)

El lenguaje de programación PHP, tiene grandes e importantes funciones, pero las más resaltantes son tres:

- Programación del lado del servidor: es una herramienta que le permite al servidor hacer webs de prueba antes de su publicación en la red, ya que se trabaja desde un navegador para acceder al programa PHP, permitiendo que el navegador muestre páginas web que son almacenadas en el servidor para que posteriormente se generen con PHP y de esta manera crear un sitio en la web.

- Programación a través de línea de comandos: se crean scripts sin necesidad de emplear un navegador o servidor. Las scripts, son un lenguaje de programación que realiza diversas funciones en el interior del programa o computador. Solo se hace necesario emplear un analizador PHP, para la posterior creación de la página web o software.
- Escribir aplicaciones de escritorio: esta función no es la más empleada con tanta frecuencia, pero PHP, es una herramienta importante que flexibiliza el desarrollo de softwares y webs, debido a su complejidad, ya que se puede emplear en distintas plataformas. (Ryte, 2020)

Los beneficios en el uso del lenguaje de programación PHP son:

- PHP puede ser empleado en cualquier tipo de servidor o sistema operativo.
- Las aplicaciones que se crean en este lenguaje de programación pueden estar orientadas al procedimiento o al proyecto.
- PHP, puede generar de manera dinámica archivos flash, PDFs, HTML e imágenes.
- Tiene un gran soporte en el almacenamiento de grandes cantidades de bases de datos diferentes.
- PHP ofrece soporte completo para poder tener comunicación del servidor con otros protocolos. (Ryte, 2020)

PHP es el lenguaje que permitió el desarrollo del software pedagógico HYDRA, dándole a este su carácter flexible al momento de su uso, quien desee emplear este software pedagógico tendrá acceso a él través de la web en herramientas tecnológicas portátiles como teléfonos

celulares, como también podrá desde su PC como un software de escritorio sin la necesidad de conexión a la red. estando siempre a la disponibilidad de los estudiantes y profesionales de la Universidad Industrial de Santander.

## **6.2. Descripción del programa HYDRA**

El software HYDRA, presenta una interfaz interactiva como se ve en la Figura 25, que le permite al estudiante tener una visión más clara de lo planteado de manera literaria en los libros viéndolo en una realidad virtual, donde se puede tener más claro los conceptos otorgados por el docente y confrontar datos bibliográficos.

El software presenta distintas herramientas de cálculo, para observar el comportamiento hidráulico dentro de una tubería, accesorios (válvulas, codos y conexiones en T), bomba centrífuga, tanques y el sistema hidráulico en conjunto, en este último se puede diseñar con las distintas combinaciones posibles dándole la libertad al docente y estudiantes de tener claro lo que puede suceder en cada una de ellas.

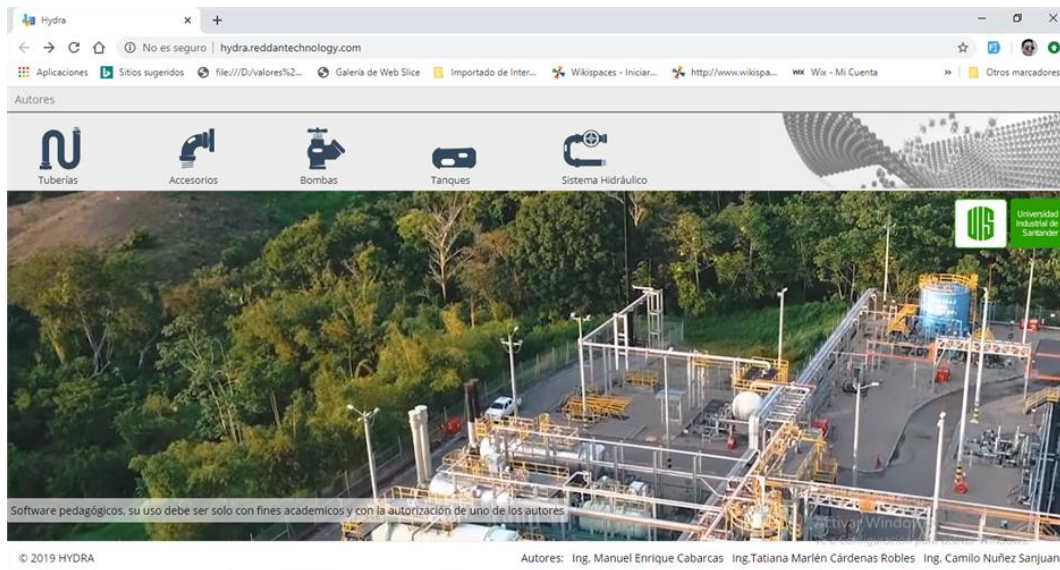


Figura 25. Interfaz del software pedagógico HYDRA.

Además, ofrece fundamentos teóricos que permite la mejor comprensión de los fenómenos que ocurren dentro de un sistema hidráulico, brindando apoyos pedagógicos como imágenes, videos, formulas, que presentan el tema de manera didáctica, se puede evidenciar en la Figura 26.

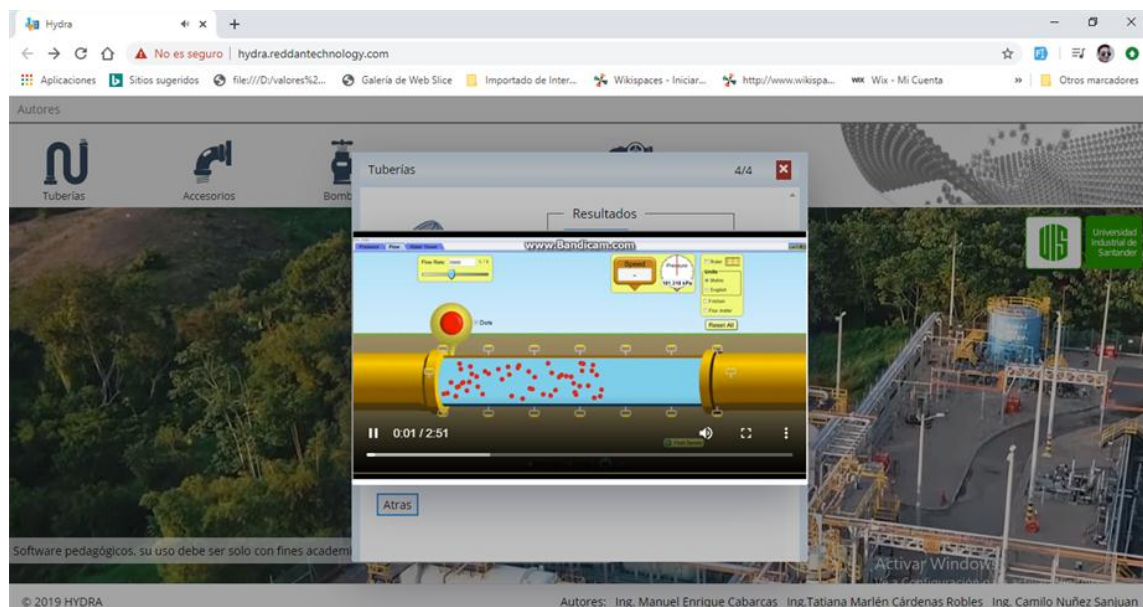


Figura 26. Video pedagógico en el software.

HYDRA, presenta cuatro módulos de cálculo individual y un quinto en donde presenta la opción al ingeniero crear de manera libre un sistema hidráulico y calcular las caídas de presión que se evidencia durante el proceso y darle a este un fundamento para el posterior análisis y evaluar la conveniencia de este.

### 6.2.1. Módulo de tuberías

En el primer módulo, es posible determinar las pérdidas en tubería y la presión de salida de esta. Como se muestra en la Figura 27 se evidencia como es necesario tener información del fluido y las dimensiones de la tubería, permitiendo con estos calcular el número de Reynolds, mostrando de manera inmediata al estudiante el tipo de fluido con el cual se enfrenta. El software también le permite beneficiar al estudiante suministrando las gráficas que este necesite en la realización del ejercicio, como es el caso de la gráfica de la rugosidad relativa, como se ve en la Figura 28.

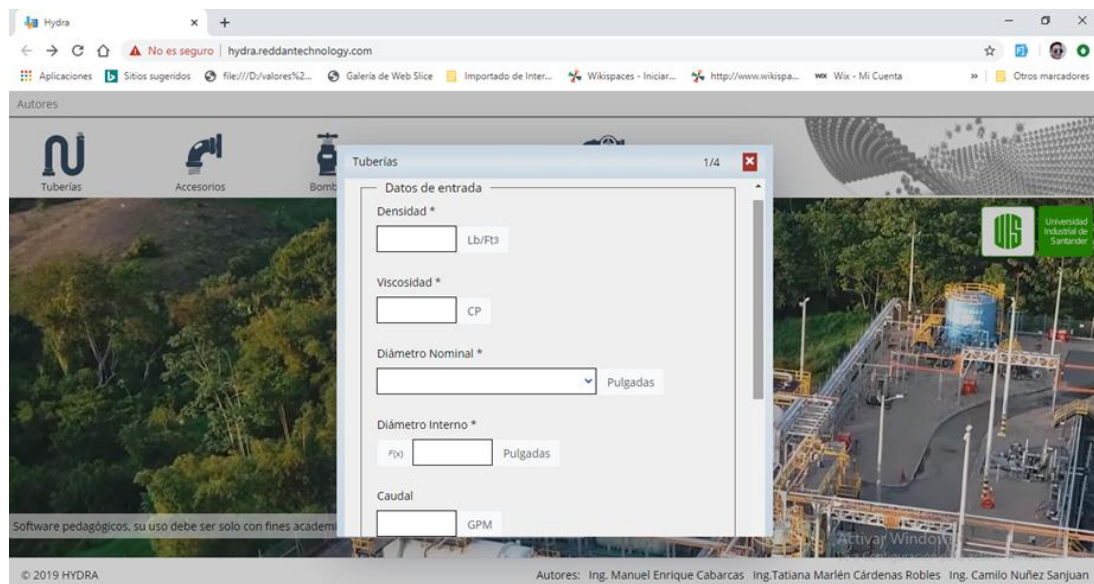


Figura 27. Datos de ingreso para el módulo uno, tuberías.

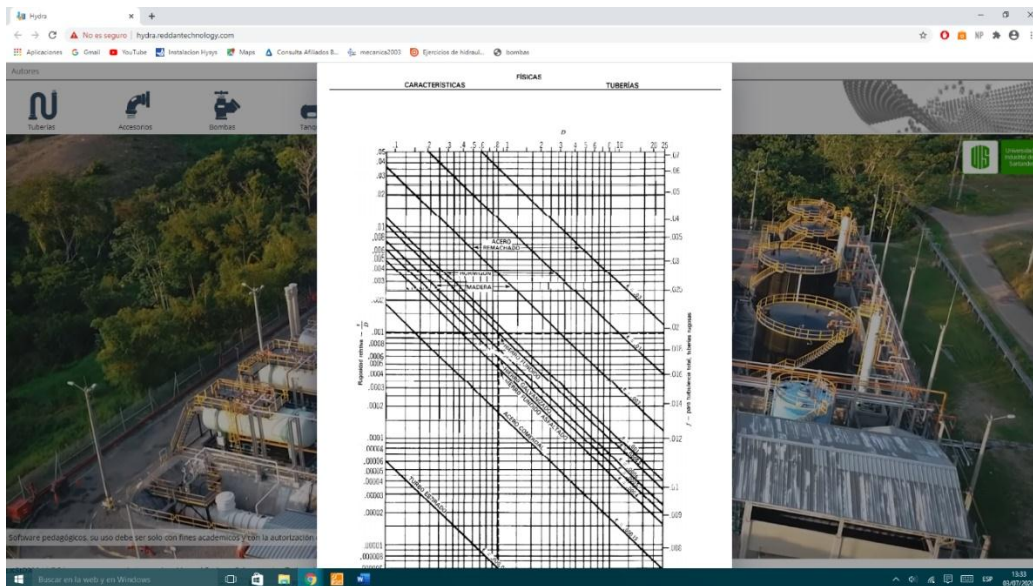


Figura 28. Grafica de la Rugosidad relativa, suministrada por el Software HYDRA.

## 6.2.2. Módulo de accesorios

En el segundo módulo permite determinar las pérdidas que ocurren en cualquier accesorio que se tenga en una tubería, ya sea un codo, conexiones en T, una válvula, que permiten determinar la viabilidad de colocarlo o no en un proyecto de una facilidad de superficie, teniendo en cuenta previamente la pérdida determinada de manera numérica por el software. Ver Figura 29.

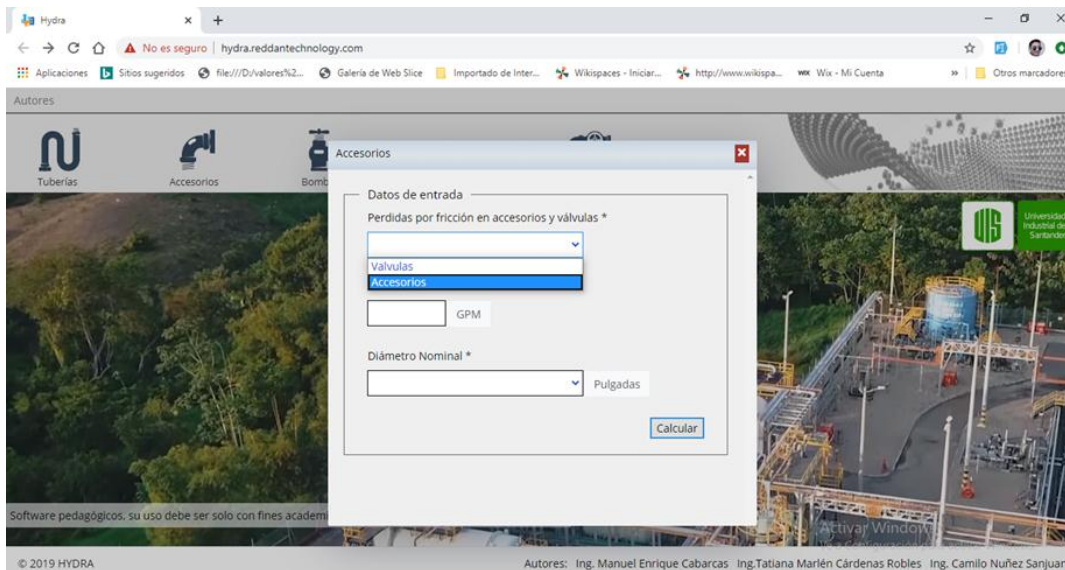


Figura 29. Módulo dos, accesorios.

### 6.2.3. Módulo de bombas

Módulo tres, en donde permite conocer de manera detallada, los cálculos importantes para la escogencia de una bomba centrífuga en un proyecto, entre ellos encontramos, la velocidad, potencia, torque, temperatura, basados en los datos de entrada que el estudiante suministre al software como las presiones, la eficiencia, entre otros, como se puede evidenciar en la Figura 30.

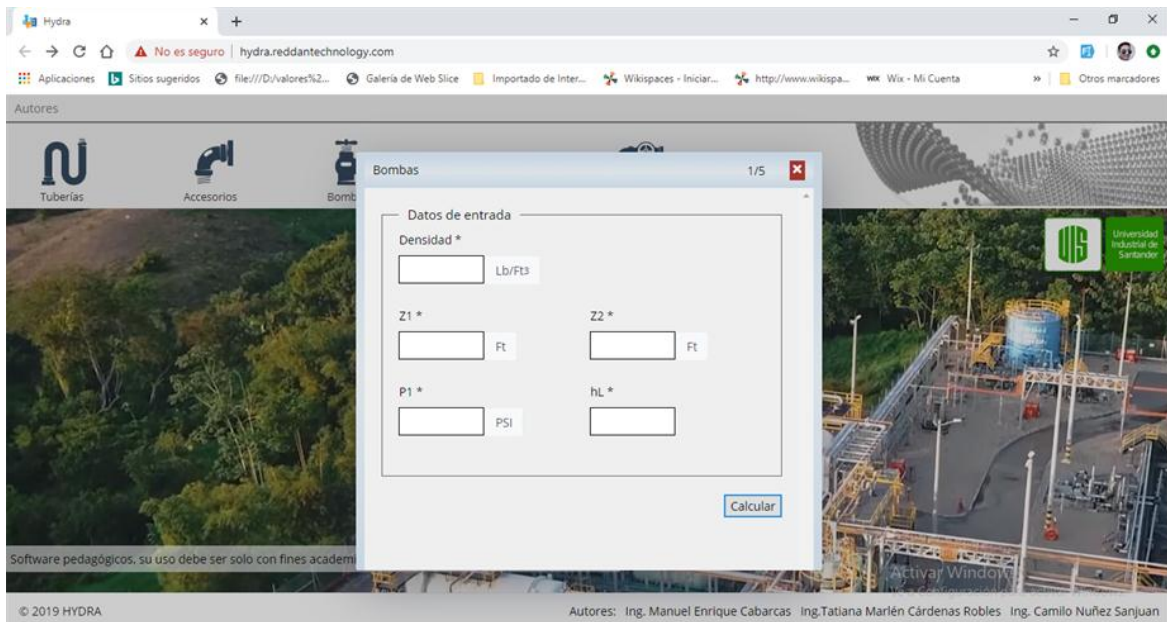


Figura 30. Módulo tres, diseño de bombas.

#### 6.2.4. Módulo de tanques

Tenemos el cuarto modulo que se encarga de diseñar de manera detallada las dimensiones que debe tener el tanque y su capacidad en barriles de acuerdo con el caudal de entrada al mismo y al tiempo de almacenamiento que tendrá nuestro fluido dentro de él, se puede observar en la Figura 31.

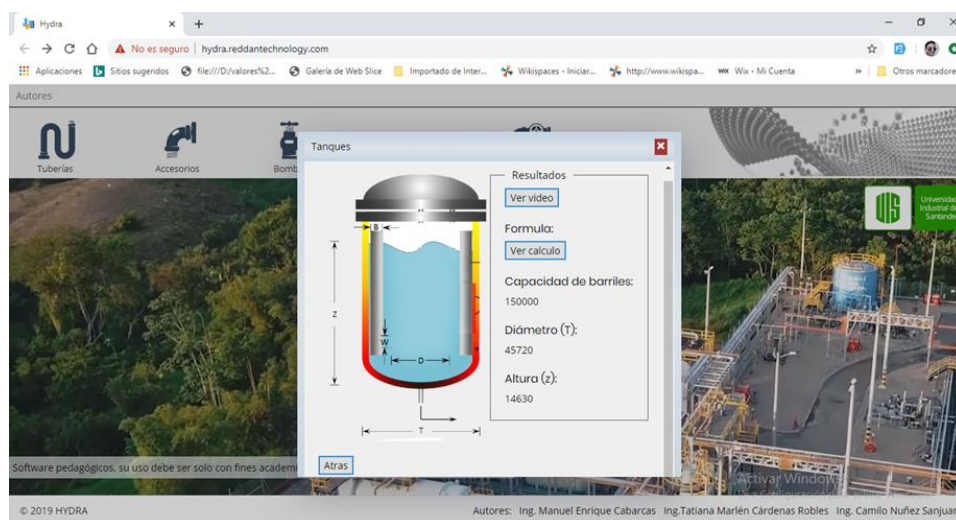


Figura 31. Resultado obtenido del dimensionamiento del tanque.

Los módulos anteriormente descritos, teniendo en cuenta la flexibilidad que tiene el lenguaje en el que fue diseñado HYDRA, el estudiante tendrá la oportunidad de llevar en su celular una herramienta de cálculo para el desarrollo, de cualquier actividad, comprendiendo que el ingeniero de hoy tiene que cruzar las barreras de la globalización y ver la tecnología como un aliado en el proceso de enseñanza- aprendizaje. El módulo de tubería, accesorios, bombas y tanques estarán dispuestos en medios electrónicos como celulares. Ver Figura 32.



Figura 32. Presentación de HYDRA, en dispositivos móviles.

### 6.2.5. Módulo sistema hidráulico

Tenemos nuestro último modelo, que permite sintetizar los módulos anteriormente descritos. Es un espacio en donde el ingeniero tendrá la facultad de desarrollar de manera práctica un sistema hidráulico y comprender todo lo que en él ocurre. En este módulo, tiene la capacidad de desarrollar de manera libre cualquier sistema hidráulico, sin que este esté predeterminado, dando la opción de evaluar distintos escenarios de la industria. En la Figura 33, se puede observar que a un costado están las distintas partes para el desarrollo de un sistema hidráulico.

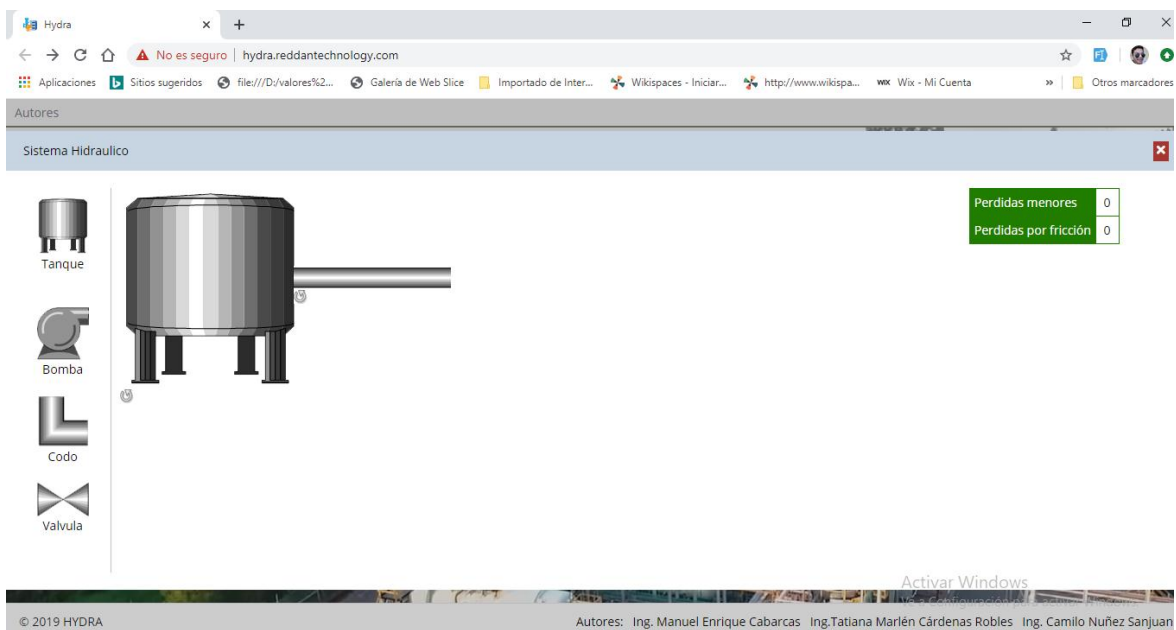


Figura 33. Módulo cinco, sistema hidráulico.

### 6.3. Validación

La validación del software se desarrolló por módulos en el mismo orden como fueron presentados anteriormente, es decir iniciando con el módulo de tuberías y finalizando con el sistema hidráulico (Tabla 3 a la 7). Los datos del fluido presentados en la Tabla 3 a la 5 fueron

tomados de un ejercicio del libro de Mott, en este libro se encontraban en unidades internacionales así que tuvimos que cambiarlas a unidades de campo, estos datos se ingresaron al simulador comercial Aspen Hysys y al software HYDRA y se compararon sus resultados.

### 6.3.1. Validación módulo tuberías

Se simuló una tubería de acero comercial con una longitud de 40 ft, una elevación de 10 ft, un diámetro nominal de 4 pulgadas Schedule 40 y se circuló por ella el fluido anteriormente dicho, los resultados se muestran en la siguiente Tabla 3.

Tabla 3.

*Validación del módulo de tuberías.*

| <b>Tuberías</b>          |          |            |            |        |
|--------------------------|----------|------------|------------|--------|
| <b>Propiedades</b>       | Unidades | Hysys      | HYDRA      | %Error |
| <b>Densidad</b>          | Lb/pie3  | 62,81      | 62,81      | 0      |
| <b>Viscosidad</b>        | Cp       | 0,8576     | 0,857      | 0,001  |
| <b>N° Reynolds</b>       |          | 184098,717 | 184227,608 | 0,001  |
| <b>Rugosidad</b>         |          | 0,00045    | 1,50E-04   | 0,667  |
| <b>Presión de salida</b> | psig     | 33,97      | 34,03      | 0,002  |

### 6.3.2. Validación módulo de accesorios

Se simuló un codo de 90° y una válvula de globo para validar este módulo ya que son unos de los accesorios más comunes, se circulo por ella el fluido anteriormente mencionado, se eligió un diámetro nominal de 4 pulgadas y continuación se presentan los resultados (Tabla 4).

Tabla 4.

*Validación del módulo de accesorios.*

| <b>Accesorios</b>         |                 |              |              |               |
|---------------------------|-----------------|--------------|--------------|---------------|
| <b>Codo 90°</b>           |                 |              |              |               |
| <b>Propiedades</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Hysys</b> | <b>HYDRA</b> | <b>%Error</b> |
| <b>Densidad</b>           | Lb/pie3         | 62,81        | 62,81        | 0             |
| <b>Viscosidad</b>         | Cp              | 0,8576       | 0,857        | 0,001         |
| <b>Presión de entrada</b> | Psig            | 30           | 30           | 0,000         |
| <b>Presión de salida</b>  | Psig            | 29,914       | 29,912       | 0,000         |
| <b>Válvula de globo</b>   |                 |              |              |               |
| <b>Propiedades</b>        | <b>Unidades</b> | <b>Hysys</b> | <b>HYDRA</b> | <b>%Error</b> |
| <b>Presión de entrada</b> | Psig            | 30           | 30           | 0             |
| <b>Presión de salida</b>  | Psig            | 29,970       | 28,980       | 0,033         |

### 6.3.3. Validación módulo de bombas

Con el mismo fluido mencionado anteriormente se ingresó a la bomba con una presión de entrada y una de salida, así como su eficiencia y encontró el BHP de bomba. Los resultados se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5.

*Validación módulo de bombas.*

| <b>Bombas</b>                 |          |        |        |         |
|-------------------------------|----------|--------|--------|---------|
| <b>Propiedades</b>            | Unidades | Hysys  | HYDRA  | %Error  |
| <b>Densidad</b>               | Lb/pie3  | 62,81  | 62,81  | 0       |
| <b>Viscosidad</b>             | cp       | 0,8576 | 0,857  | 0,001   |
| <b>Presión de entrada</b>     | psig     | 30     | 30     | 0       |
| <b>Presión de salida</b>      | psig     | 100    | 100    | 0       |
| <b>Eficiencia de la bomba</b> | %        | 56     | 56     | 0       |
| <b>BHP</b>                    | hp       | 14,47  | 14,577 | 0,00739 |

#### **6.3.4. Validación módulo de tanques**

En el diseño del tanque se generó mediante una Tabla 6 de recomendaciones comerciales, la cual se muestra a continuación, por lo tanto, no se pudo validar los resultados por medio de un software comercial, lo que se hizo fue introducir un caudal de 200 GPM por un tiempo definido, 21 días y comprobar que los resultados (Figura 34 y 35) fueran acordes con los de la Tabla 6.

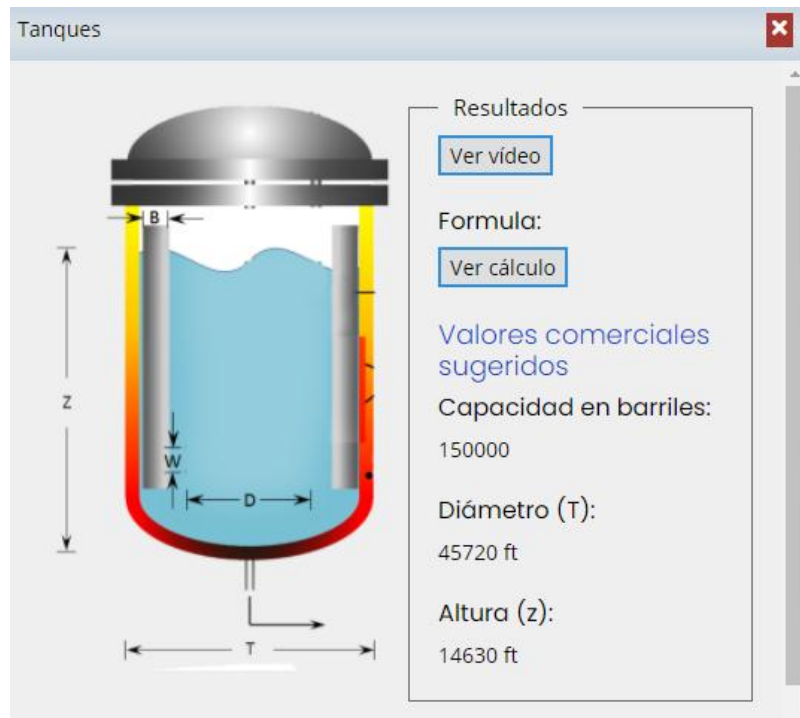


Figura 34. Resultados diseño de tanques.

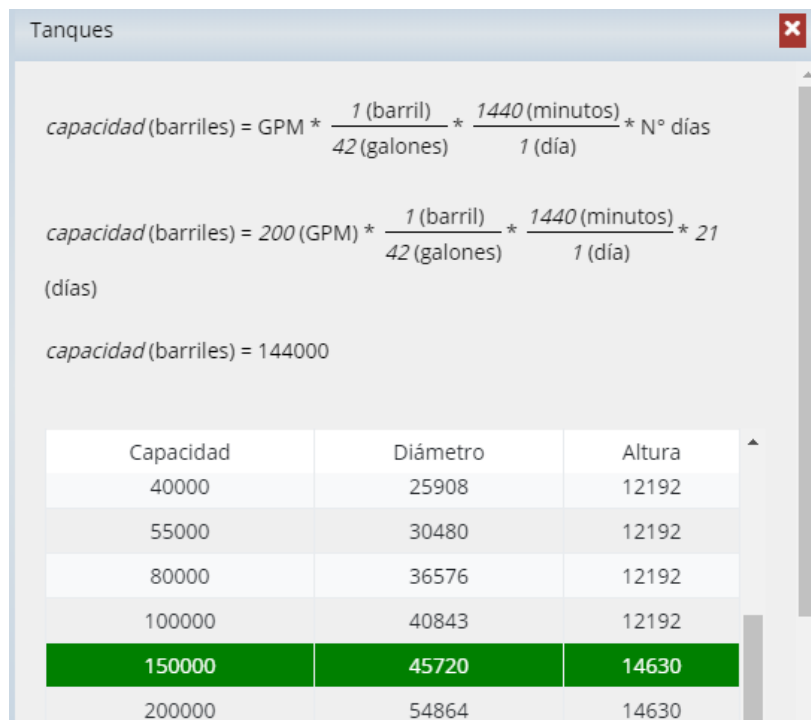


Figura 35. Resultado diseño de tanques HYDRA

Tabla 6.

Validación módulo de tanques.

|   |                               |  |
|---|-------------------------------|--|
| <br><b>DCIDP</b><br><b>SUBDIRECCIÓN DE INGENIERÍA</b><br><b>GERENCIA DE NORMATIVIDAD TÉCNICA</b> | <b>ESPECIFICACIÓN TÉCNICA</b> | <b>No de Documento:</b><br><b>GNT-SSNP-M001-2005</b> |
|   | <b>TANQUES ATMOSFÉRICOS</b>   | <b>REVISIÓN: 0</b><br><b>PÁGINA 20 DE 20</b>         |

## ANEXO 3

## DIMENSIONES DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO ATMOSFÉRICOS

| <b>CAPACIDAD</b><br>Barriles<br>(Metros cúbicos) | <b>DIÁMETRO</b><br>Metros<br>(Pies) | <b>ALTURA</b><br>Metros<br>(Pies) |
|--|-------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>1000</b><br>(159)                             | <b>6.096</b><br>(20)                | <b>5.486</b><br>(18)              |
| <b>2000</b><br>(318)                             | <b>7.468</b><br>(24.5)              | <b>7.315</b><br>(24)              |
| <b>3,000</b><br>(477)                            | <b>9.144</b><br>(30.00)             | <b>7.315</b><br>(24.00)           |
| <b>5,000</b><br>(795)                            | <b>9.652</b><br>(31.66)             | <b>10.973</b><br>(36.00)          |
| <b>10,000</b><br>(1,590)                         | <b>12.954</b><br>(42.50)            | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>15,000</b><br>(2,385)                         | <b>17.678</b><br>(58.00)            | <b>9.754</b><br>(32.00)           |
| <b>20,000</b><br>(3,180)                         | <b>18.288</b><br>(60.00)            | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>30,000</b><br>(4,770)                         | <b>22.352</b><br>(73.33)            | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>40,000</b><br>(6,360)                         | <b>25.908</b><br>(85)               | <b>12.192</b><br>(40)             |
| <b>55,000</b><br>(8,745)                         | <b>30.480</b><br>(100.00)           | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>80,000</b><br>(12,720)                        | <b>36.576</b><br>(120.00)           | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>100,000</b><br>(15,880)                       | <b>40.843</b><br>(134.00)           | <b>12.192</b><br>(40.00)          |
| <b>150,000</b><br>(23,850)                       | <b>45.720</b><br>(150.00)           | <b>14.630</b><br>(48.00)          |
| <b>200,000</b><br>(31,800)                       | <b>54.864</b><br>(180.00)           | <b>14.630</b><br>(48.00)          |
| <b>500,000</b><br>(79,500)                       | <b>85.344</b><br>(280.00)           | <b>14.630</b><br>(48.00)          |

Nota: La tabla anterior fue tomada de un documento perteneciente a la compañía PEMEX sobre el diseño de tanques atmosféricos, en ella se muestran las dimensiones comerciales recomendadas para tanques atmosféricos.

### 6.3.5. Validación módulo sistema hidráulico

Para la validación del sistema hidráulico se tomó las propiedades del fluido del campo Yaguará, estos datos fueron tomados de la tesis de análisis de una alternativa química no convencional para optimizar el factor de recobro en el campo Yaguará de Juan Cruz. Este fluido se introdujo en un sistema hidráulico típico como el mostrado anteriormente en la figura 23 y se simuló en el simulador comercial Aspen Hysys y en el software Hydra para finalizar se compararon los resultados obtenidos como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7.

*Validación sistema hidráulico.*

| <b>Sistema hidráulico</b>     |          |          |         |         |
|-------------------------------|----------|----------|---------|---------|
| <b>Propiedades</b>            | Unidades | Hysys    | HYDRA   | %Error  |
| <b>Densidad</b>               | Lb/pie3  | 56,1154  | 56,12   | 0       |
| <b>Viscosidad</b>             | cp       | 85,057   | 85,06   | 0,004   |
| <b>Presión de succión</b>     | psig     | 33,112   | 32,470  | 1,939   |
| <b>Presión de descarga</b>    | psig     | 95,00957 | 95,4698 | 0,484   |
| <b>Eficiencia de la bomba</b> | %        | 56       | 56      | 0       |
| <b>BHP</b>                    | hp       | 12,89    | 13,21   | 0,00739 |

## Conclusiones

- Basados en el desarrollo bibliográfico se puede concluir que, en el desarrollo de un sistema hidráulico, cada uno de los parámetros que influyen en el proceso de transporte de fluidos monofásicos, presión, caudal, diámetro y longitud de la tubería, la altura y los accidentes, influyen de manera directa en el comportamiento del fluido en el sistema, así como en el dimensionamiento de las bombas.
- El software HYDRA, permite calcular las pérdidas en un sistema hidráulico de forma detallada permitiendo comprender el comportamiento del fluido en el sistema. Asimismo, se presenta una interfaz, didáctica y pedagógica donde se presentan videos que reforzaran los conocimientos teóricos del tema, permitiendo facilitar el entendimiento de los fenómenos presentes en el proceso de transporte de fluidos monofásicos.
- HYDRA, es un software pedagógico, que permite a los estudiantes de ingeniería de petróleos adquieran más competencias en el área del análisis de resultados, disminuyendo el tiempo invertido en cálculos mecánicos, sin olvidar que son fundamentales en el desarrollo integral de un ingeniero.
- El software pedagógico HYDRA, debido al lenguaje en el que se encuentra diseñado, flexibiliza el proceso de enseñanza-aprendizaje, este se puede encontrar en la red o se puede instalar en los diferentes dispositivos electrónicos, como teléfonos móviles y computadores.

- En la situación actual, este software es una herramienta que viene a complementar las clases de facilidades de superficies disminuyendo la brecha que se ha formado a pasar de la presencialidad a la virtualidad.
- A partir de los resultados obtenidos por el software pedagógico HYDRA, haciendo la comparación con software tipo comercial Hysys, se puede evidenciar que el error de cálculo está por debajo de 2%.

## Recomendaciones

- Darle un espacio a HYDRA en la red, al adquirir un dominio para este software se aumentará el número de estudiantes que tengan acceso al mismo, permitiendo el acceso desde cualquier computador o dispositivo móvil, sin la necesidad de su instalación y evitando errores en este proceso.
- Para que los resultados estén dentro de los parámetros establecidos es necesario tener en cuenta las unidades en la que HYDRA está diseñado.
- En el diseño de accesorios y válvulas hay que tener claro el subtipo que se va a emplear, ya que las pérdidas menores dependerán del tipo de accesorio que tengamos.
- En el diseño del sistema hidráulico siempre se debe tener en cuenta la altura con respecto al nivel de referencia tanto en el diseño de tuberías como en el diseño de sistemas hidráulicos. Ya que esta representa la energía potencial del sistema.
- Agregar más unidades, el software solo trabaja con las unidades con el que fue diseñado, agregar más unidades evitara que las personas tengan que hacer conversiones de unidades previas al uso de este.
- En el diseño del tanque se debe tener en cuenta que las dimensiones que HYDRA genera son basadas en una tabla de recomendaciones comerciales y no en valores exactos de cálculo.

## Referencias

- Cruz, J, S. (2019). *Análisis de una alternativa química no convencional para optimizar el factor de recobro en el campo Yaguará mediante simulación numérica*. Fundación Universidad de América, Bogotá.
- De las Heras, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas (Primera edición)*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- E.W. McAllister (2009). *Pipeline Rules of Thumb Handbook, Seventh Edition: A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Pipeline Engineering Problems*. Elsevier Inc.
- Herrera, J. A. (2015). *Diseño y elaboración del oleoducto Villanueva - Vasconia*. Universidad Industrial de Santander.
- Grundfos. (s. f.). *¿Qué es el golpe de ariete y qué lo provoca?*  
[https://es.grundfos.com/Servicio\\_mantenimiento\\_bombas/support-contact/faq/what-is-water-hammering-and-what-causes-it.html](https://es.grundfos.com/Servicio_mantenimiento_bombas/support-contact/faq/what-is-water-hammering-and-what-causes-it.html)
- Karassik, J., Carter, R., & Berumen, A. (1966). *Bombas centrifugas: Selección, operación y mantenimiento*. México: Continental.
- Martín, I., Salcedo, R., & Fort, R. (2011). *Mecánica de fluidos Tema 2. Impulsión de fluidos*. Universidad de Alicante.

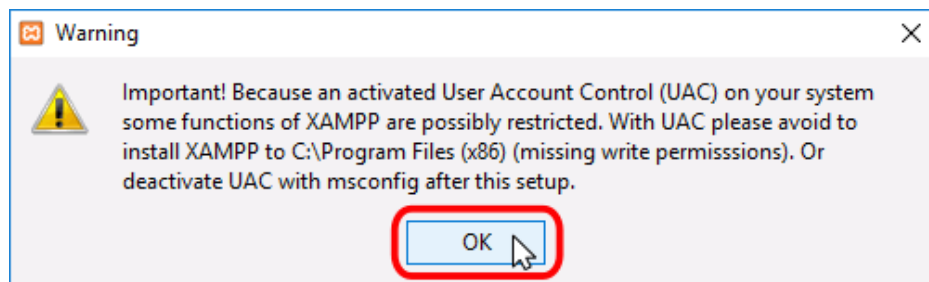
- Martínez, G. (2016). *Diseño y estudio de una bomba hidráulica centrífuga mediante la generación de su prototipo virtual*. Universidad Politécnica de Valencia.
- McAllister, E. W. (2009). *Pipeline Rules of Thumb Handbook* (7th Edition ed.). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-500-5.X0001-5>
- McNaughton, K., J. (1992). *Bombas: selección, uso y mantenimiento*. McGraw-Hill.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (sexta ed.). México: Pearson Educación.
- Pardo, P., & Rodríguez, Y. (2005). *Transferencia de calor en tuberías de producción/inyección en un pozo*. Universidad Central de Venezuela.
- Pérez, L. (2016). *Desarrollo e implementación de un software de selección de bombas centrífugas para la empresa mantenimiento técnicos integrados Ltda*. Universidad Industrial de Santander.
- Ryte. (2020). *¿Qué Es El Lenguaje PHP? - Ryte Digital Marketing Wiki*.  
<https://es.ryte.com/wiki/PHP>
- Solorzano, R. (2016, 13 junio). Cavitación en sistemas hidráulicos. *Hydraulics & Pneumatics*.  
<https://www.hydraulicspneumatics.com/hp-en-espanol/article/21886592/cavitacin-en-un-sistema-hidrulico>

## Anexos

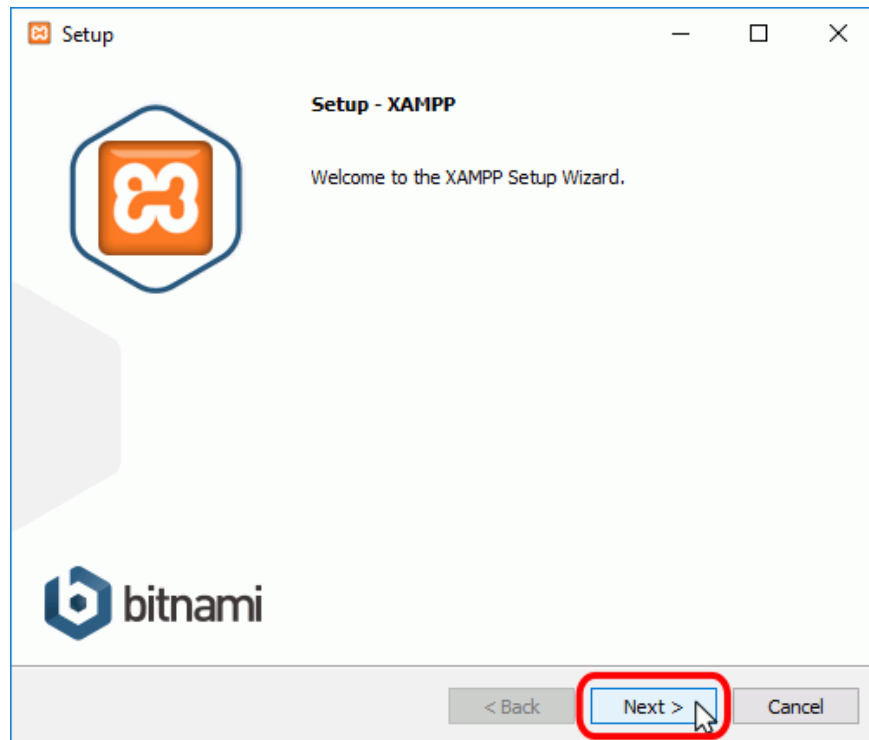
### Anexo A. Manual de instalación de HYDRA.

Debido al lenguaje de PHP que se empleó para la creación de este software, se tiene la posibilidad de adquirir un dominio, para tener una URL de acceso y mantenerlo a la disposición en la red. En caso de que se quiera tener en nuestro escritorio se hace necesario realizar los siguientes pasos, para poder disfrutar de las posibilidades pedagógicas que brinda el software.

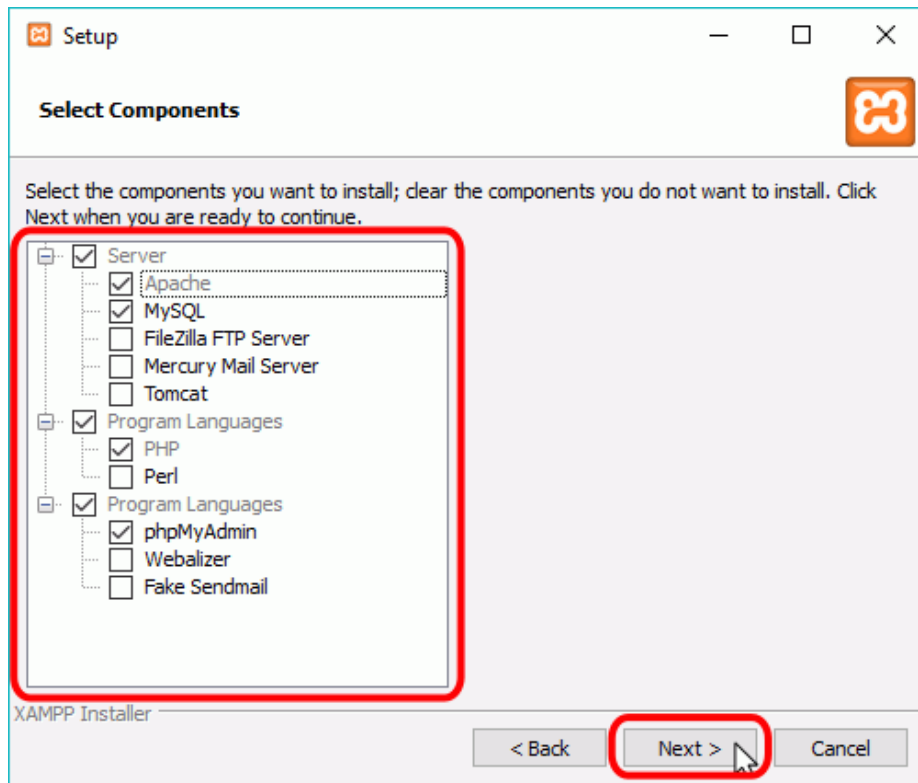
Una vez obtenido el archivo de instalación de XAMPP, hay que hacer doble clic sobre él para ponerlo en marcha. Al poner en marcha el instalador XAMPP nos muestra un aviso que aparece si está activado el Control de Cuentas de Usuario y recuerda que algunos directorios tienen permisos restringidos:



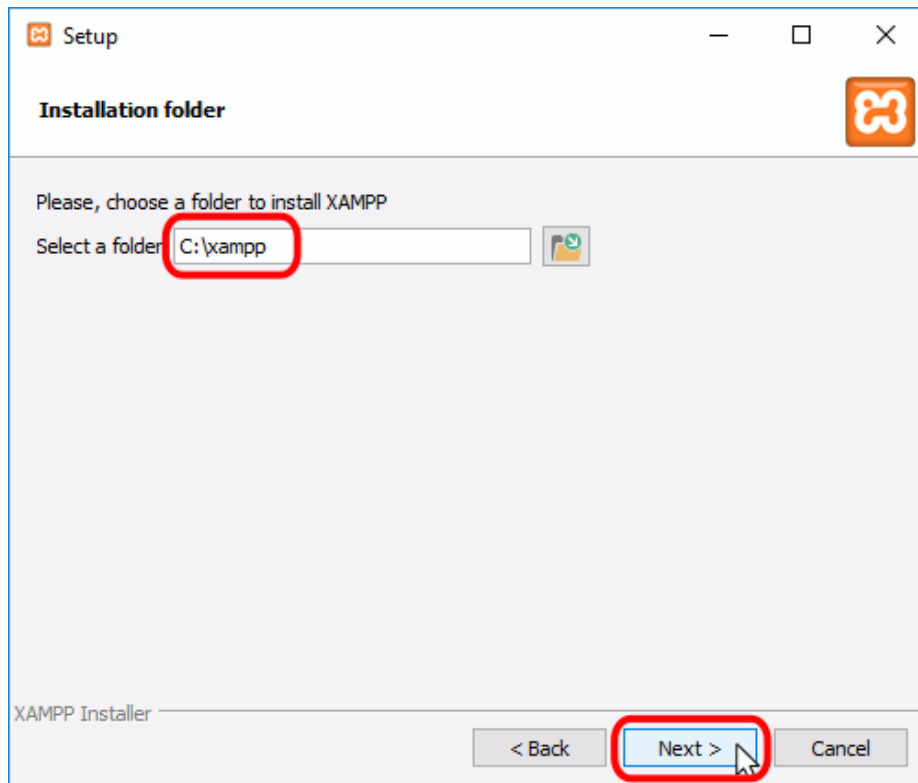
A continuación, se inicia el asistente de instalación. Para continuar, haga clic en el botón "Next".



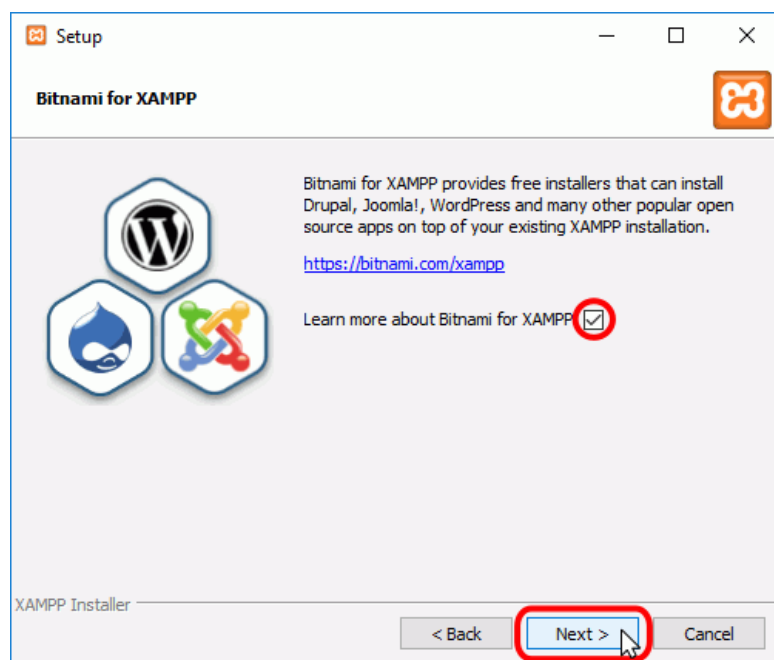
Los componentes mínimos que instala XAMPP son el servidor Apache y el lenguaje PHP, pero XAMPP también instala otros elementos. En la pantalla de selección de componentes puede elegir la instalación o no de estos componentes. Para seguir estos apuntes se necesita al menos instalar MySQL y phpMyAdmin.



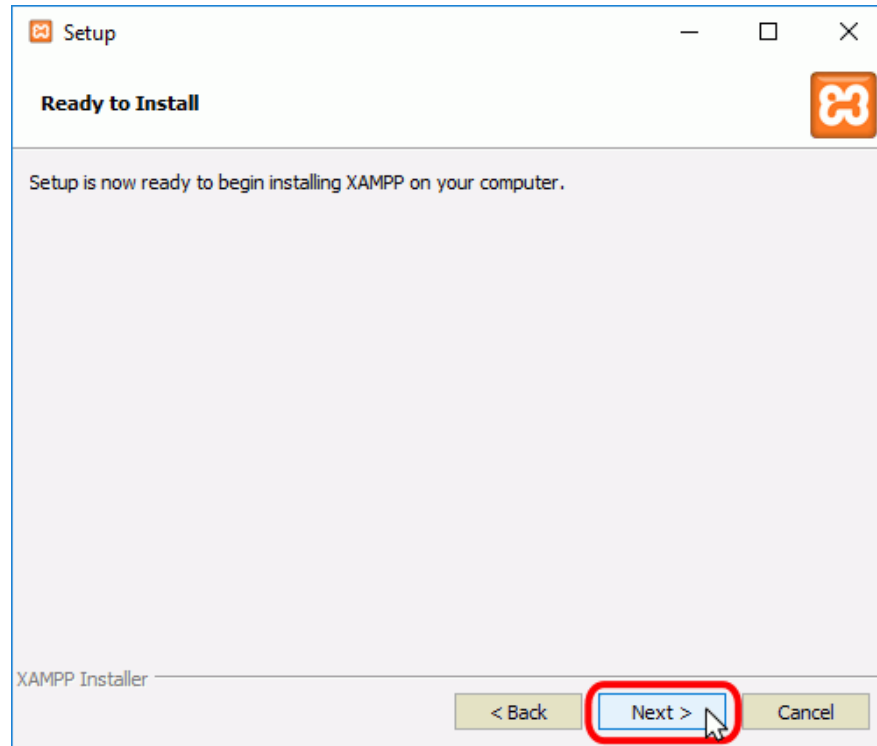
En la siguiente pantalla puede elegir la carpeta de instalación de XAMPP. La carpeta de instalación predeterminada es C:\xampp. Si quiere cambiarla, haga clic en el icono de carpeta y seleccione la carpeta donde quiere instalar XAMPP. Para continuar la configuración de la instalación, haga clic en el botón "Next".



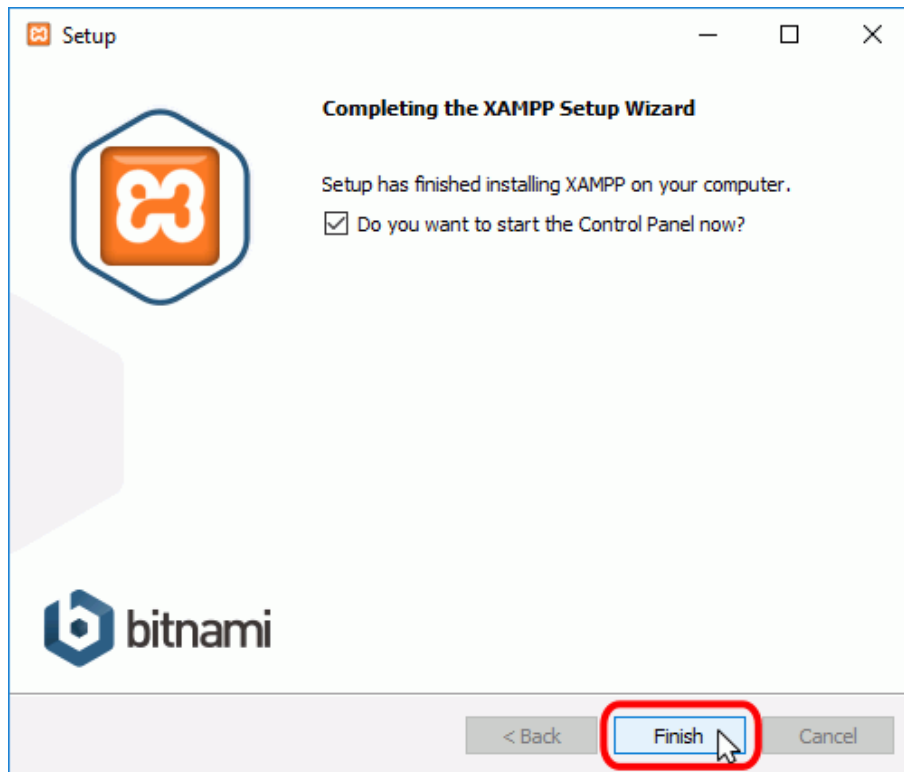
La siguiente pantalla ofrece información sobre los instaladores de aplicaciones para XAMPP creados por Bitnami. Haga clic en el botón "Next" para continuar. Si deja marcada la casilla, se abrirá una página web de Bitnami en el navegador.



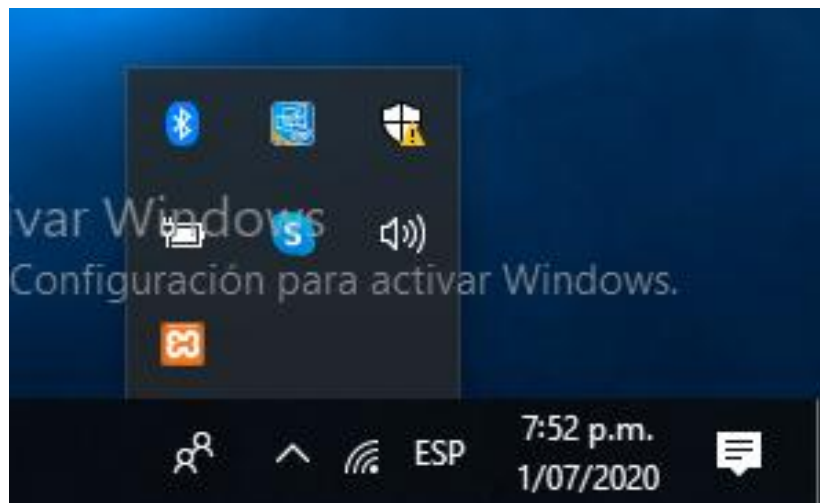
Una vez elegidas las opciones de instalación en las pantallas anteriores, esta pantalla es la pantalla de confirmación de la instalación. Haga clic en el botón "Next" para comenzar la instalación en el disco duro.

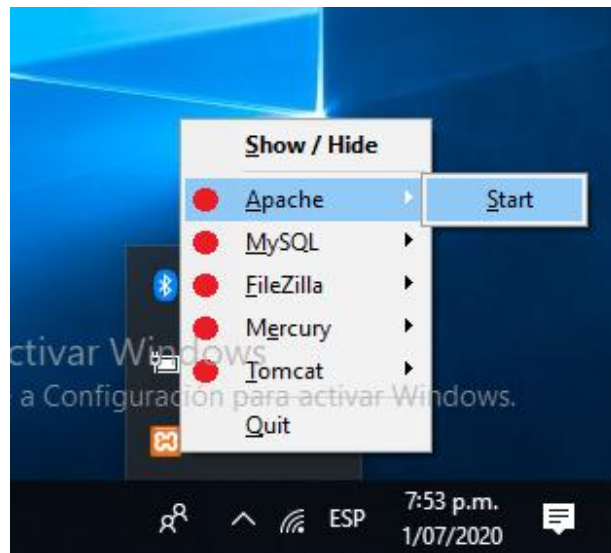


Una vez terminada la copia de archivos, la pantalla final confirma que XAMPP ha sido instalado. Si se deja marcada la casilla, se abrirá el panel de control de XAMPP. Para cerrar el programa de instalación, haga clic en el botón "Finish".

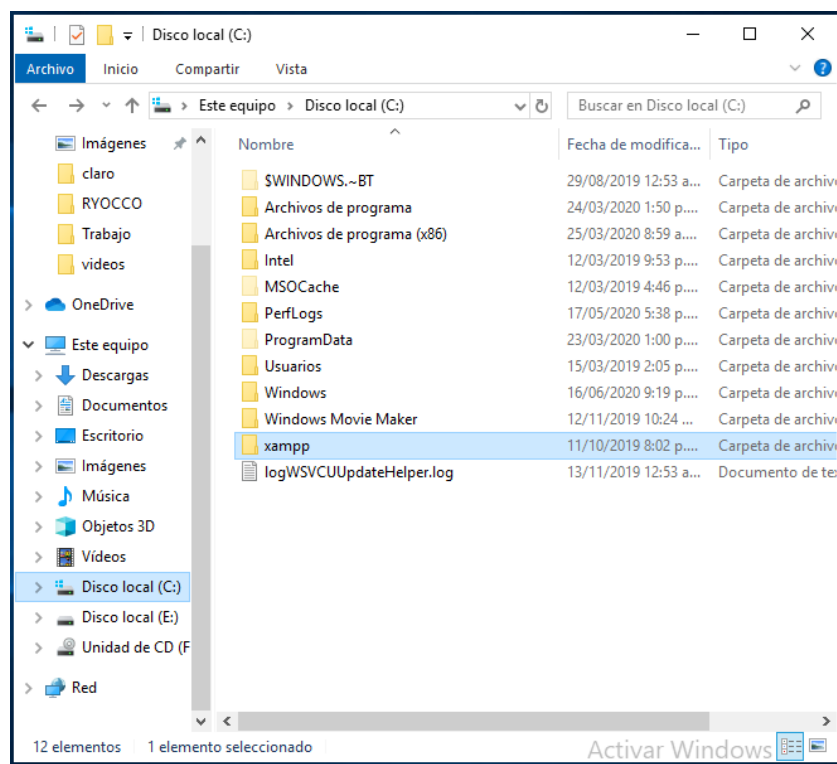


Luego en el panel de control y buscamos el logo de XAMPP, damos clic derecho sobre este icono y damos start donde dice Apache y activamos el programa.

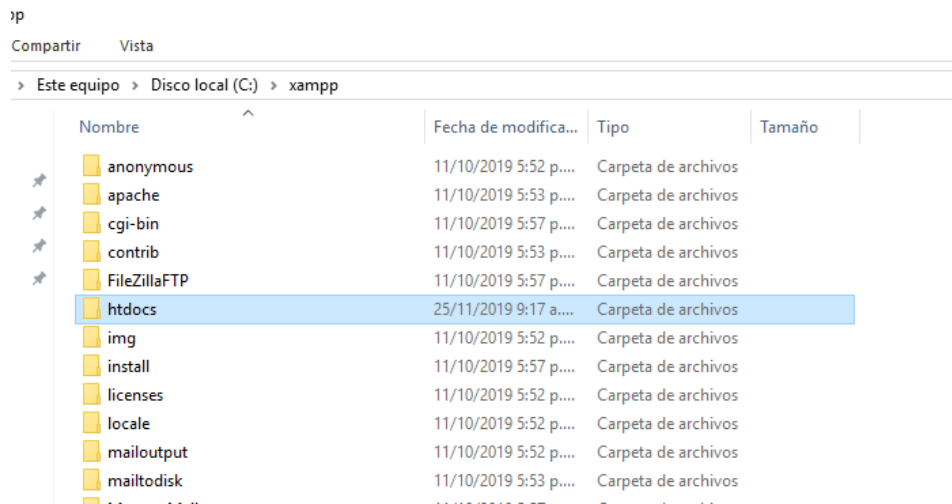




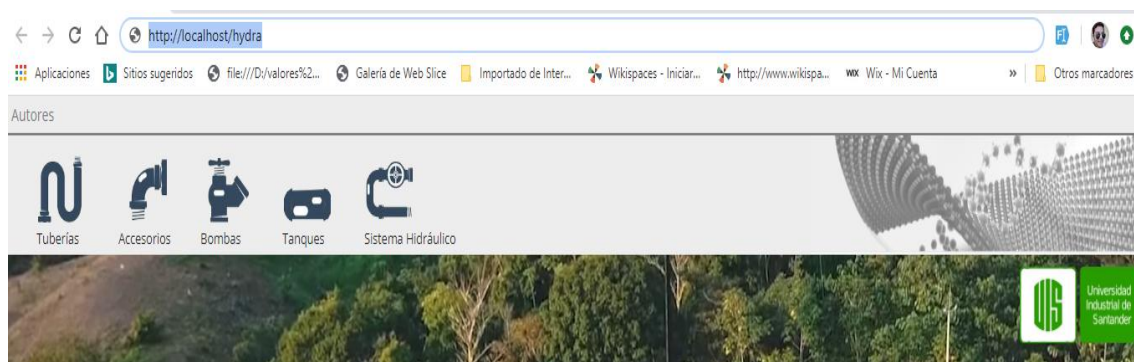
Posterior a lo anterior y con el archivo comprimido del software pedagógico HYDRA, se dirige al disco local C, luego a la carpeta de xampp.



Se abre esta carpeta y luego nos dirigimos a la carpeta “htdocs”, estando en la misma pegaremos el archivo comprimido de HYDRA para luego descomprimirlo.

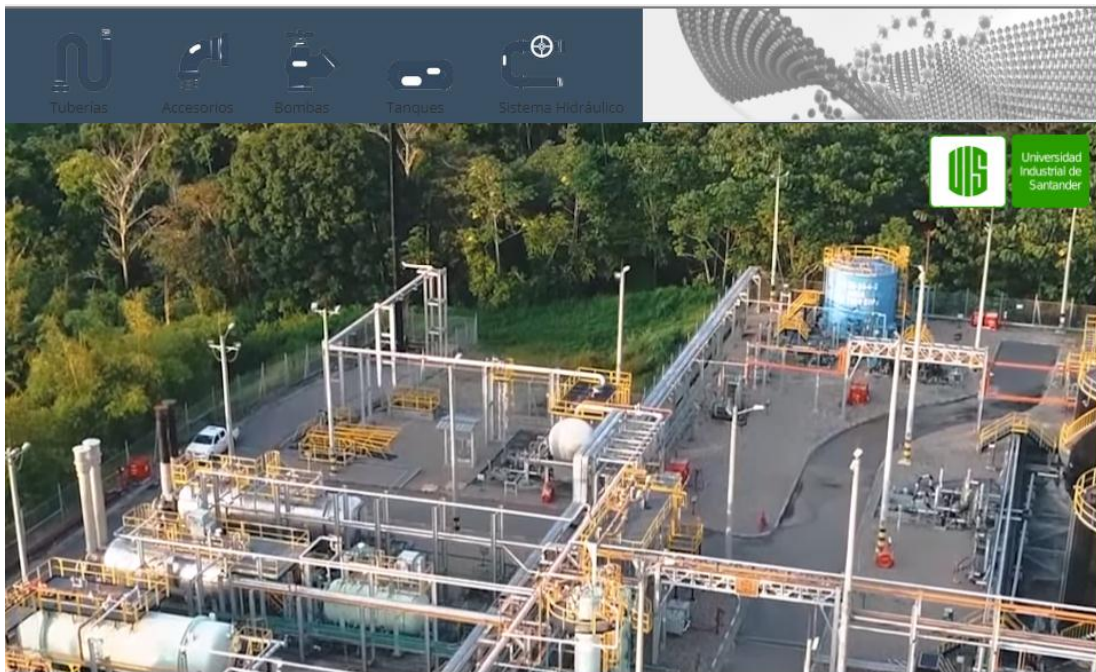


Para finalizar entramos al buscador de Google, en donde colocaremos <http://localhost/hydra> y este de manera remota llamara al programa.



## Anexo B. Manual de uso del software pedagógico HYDRA

Ya con el software disponible para su uso, se puede observar en su pantalla inicial cinco módulos, en donde los cuatro primeros son cálculos individuales de tubería, accesorios, bombas, tanque y un último modulo que permite la creación de un sistema hidráulico con todas sus etapas.



Durante la realización de cada uno de los cálculos, la aplicación permitirá a quien la emplee, tener de manera clara las fórmulas empleadas en el proceso matemático y dejando en claro el trasfondo del valor obtenido. Las fórmulas se pueden evidenciar al costado del resultado que se obtuvo durante la elaboración del ejercicio.

Tuberías 2/4

Cálculo de las pérdidas por fricción

Numero de Reynolds \*

Calculo Matemático

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{50.6 * Q \rho}{DM}$$

$Q = \text{Caudal (GPM)}$   
 $\rho = \text{Densidad (Lb/FT}^3\text{)}$   
 $D = \text{Diámetro (Pulgadas)}$   
 $M = \text{Viscosidad (CP)}$

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{50.6 * (200 * 62)}{4.026 * 0.85}$$

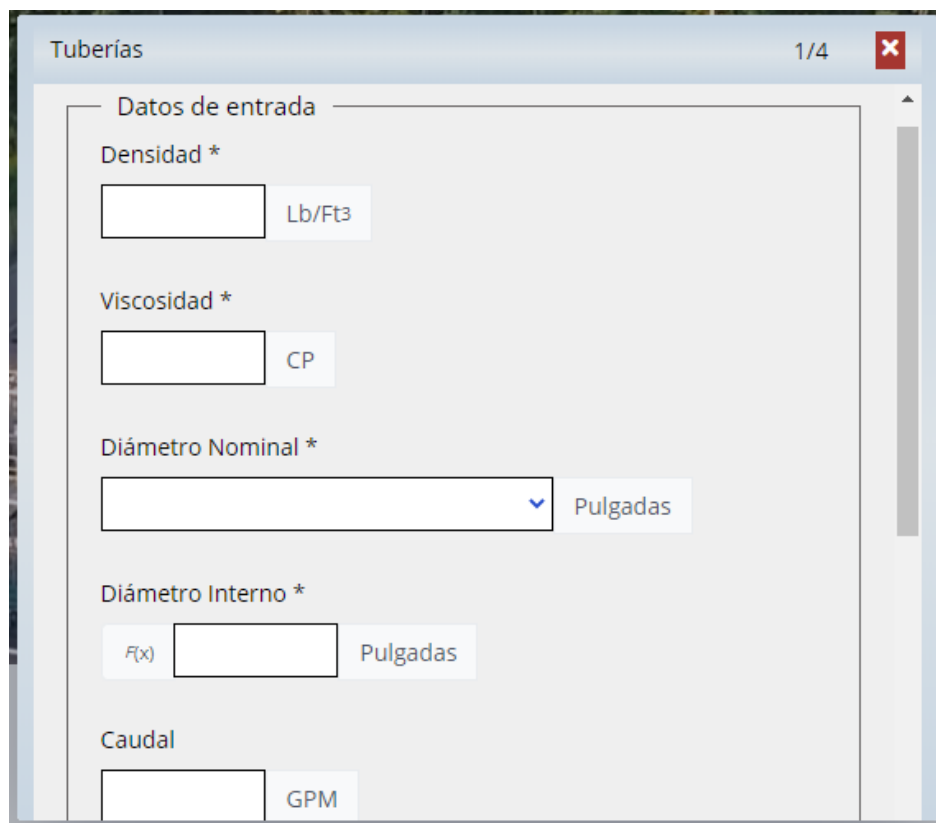
$N^{\circ} \text{ de Reynolds} =$   
**183349.40533590486**

Perdidas tuberías \*

fm  F(x)

hf  F(x)

En el módulo uno tuberías, el software pedirá al estudiante que este ingrese parámetros relacionados con el fluido que transportará como viscosidad, densidad, presión y datos relacionados netamente con las características de la tubería como diámetro nominal, valor que se selecciona y automáticamente aparecerá el diámetro interno y la longitud, como se ve en la figura.



The image shows a software window titled "Tuberías" with a close button in the top right corner. The window contains a section titled "Datos de entrada" with the following fields:

- Densidad \***: A text input field followed by a unit selector set to "Lb/Ft³".
- Viscosidad \***: A text input field followed by a unit selector set to "CP".
- Diámetro Nominal \***: A dropdown menu with a downward arrow, followed by a unit selector set to "Pulgadas".
- Diámetro Interno \***: A text input field with a function button labeled "F(x)" to its left, followed by a unit selector set to "Pulgadas".
- Caudal**: A text input field followed by a unit selector set to "GPM".

Luego se da en el botón calcular, para determinar el número de Reynolds, posterior el software le dirá al estudiante de manera teórica el régimen del fluido.

Tuberías 2/4

**Cálculo de las pérdidas por fricción**

Numero de Reynolds \*

$f(x)$

Régimen de Flujo \*

$f(x)$

**Perdidas tuberías \***

$f_m$    $f(x)$

$h_f$    $f(x)$

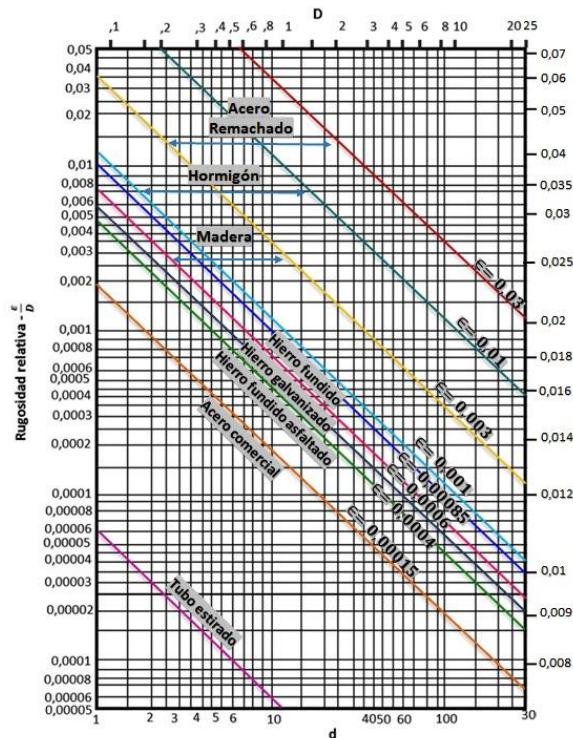
Calculo Matemático

*Reinols* = 183349.40533590486

| Condición               | Flujo       |
|-------------------------|-------------|
| Reinols < 2000          | Laminar     |
| Reinols > 2000 & < 4000 | Transitorio |
| Reinols > 4000          | Turbulencia |

*Régimen de flujo* = **Turbulencia**

En el siguiente recuadro en caso de tener un régimen de fluido turbulento, se es necesario ingresar la rugosidad relativa, en donde HYDRA, brinda al costado de este mismo recuadro, una opción que despliega una gráfica que permite hallar tal valor; como se observar en la figura siguiente.



Con los valores anteriores se calcula las pérdidas en tubería, se da la opción calcular y se tendrá que ingresar las energías potenciales ( $Z_1$  y  $Z_2$ ), para que por último el software calcule la presión de salida de la tubería.

Tuberías
3/4
✕

Cálculo de presión a la salida de la tuberías

Energía potencial a la entrada del tubo \*

Z1  Ft

Energía potencial a la salida del tubo \*

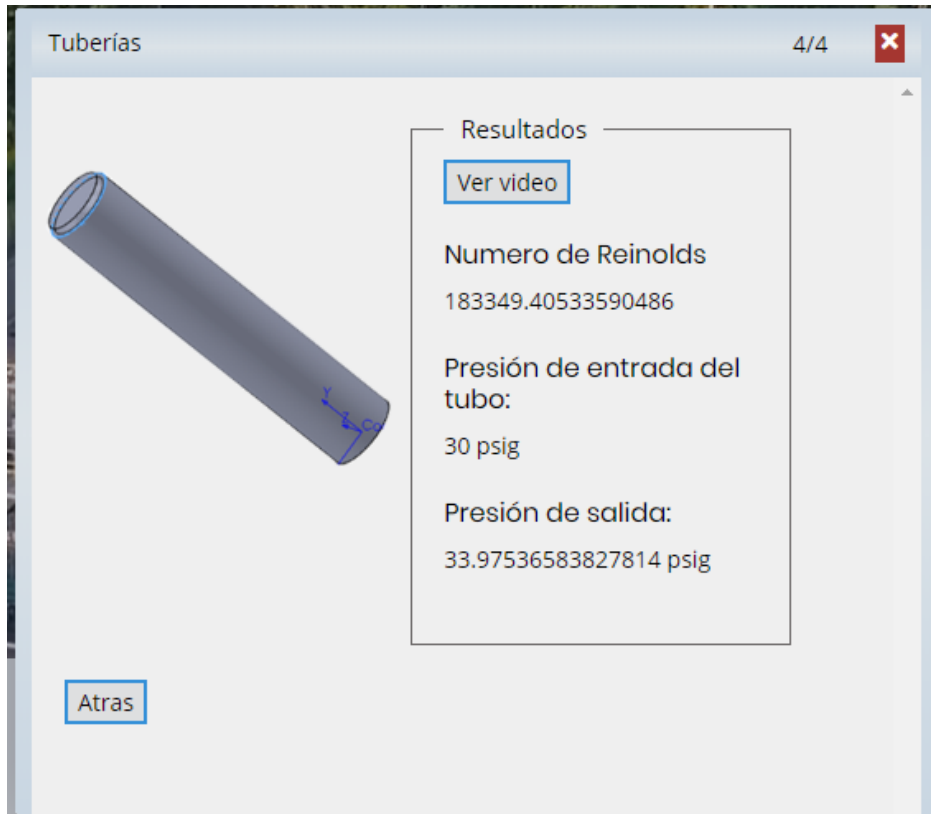
Z2  Ft

Presión a la salida del tubo \*

P2  F(x)

Atras
Diseñar

Al finalizar se da la opción diseñar y aparecerá un recuadro en donde está la opción de ver un video pedagógico que le permitirá al estudiante afianzar sus conocimientos, con los resultados obtenidos anteriormente durante el proceso.





En el siguiente modulo accesorios, se tiene la opción de hallar las pérdidas en un accesorio o en una válvula.

Accesorios

Datos de entrada

Perdidas por fricción en accesorios y válvulas \*

Caudal

Diámetro Nominal \*

Calcular

En caso de seleccionar válvulas, aparecerá otro recuadro que permite escoger el tipo de válvula, posterior, se ingresa el caudal y se escoge la opción del diámetro nominal, este mismo procedimiento se emplea para calcular las pérdidas en un accesorio, ya que se escoge el tipo de accesorio, en caso de que este accesorio o válvula tenga un subtipo, el software se lo requerirá.

Accesorios

Datos de entrada

Perdidas por fricción en accesorios y válvulas \*

Valvulas

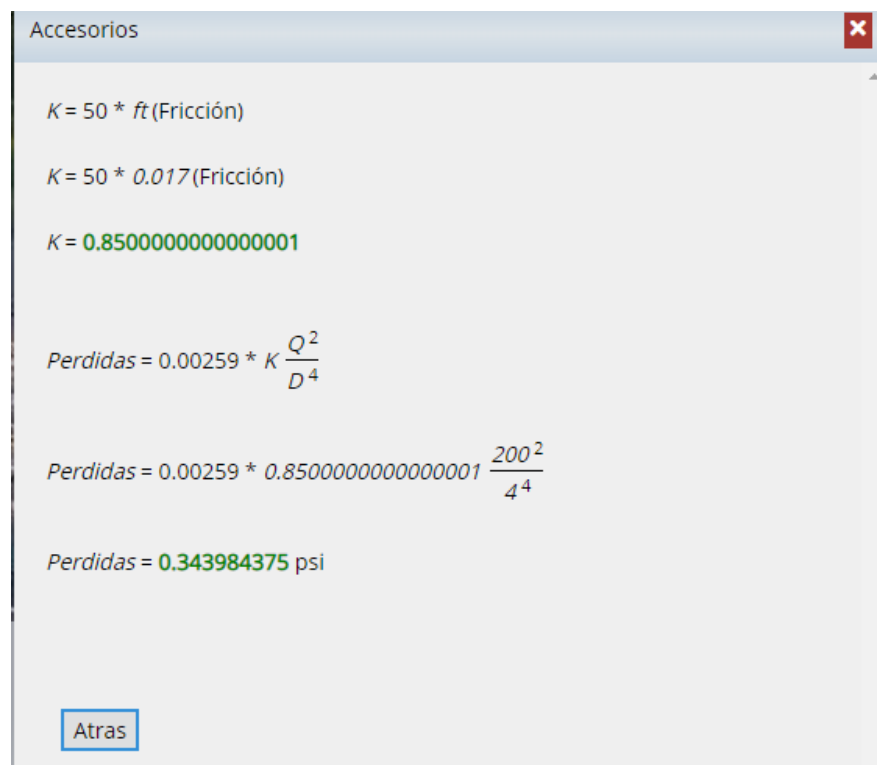
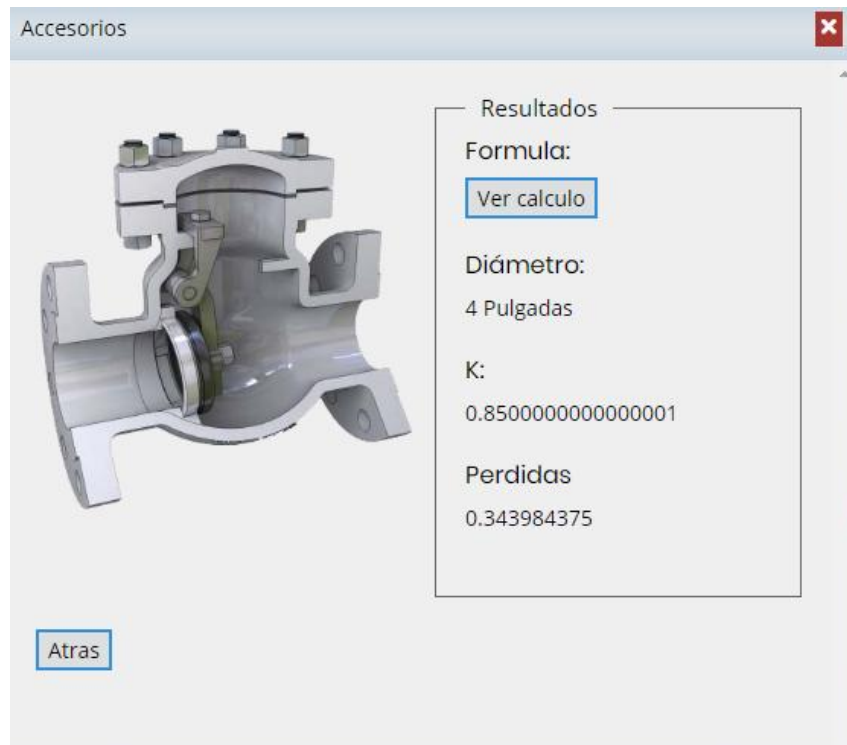
Valvulas

- Compuerta
- Retención y Oscilación
- Globo y Angulo
- Retención de Elevación

Pulgadas

Calcular

Al calcular las pérdidas, se presenta al final un recuadro con los valores obtenidos y las fórmulas.



En el tercer módulo de bombas, se ingresa valores en las casillas requeridas, como densidad del fluido, energías potenciales (Z1 y Z2), presión de entrada a la bomba y las pérdidas energéticas aguas arriba de la bomba. Se da clic en calcular y se obtendrá el valor de la presión de salida o presión de descarga de la bomba.

Bombas 1/5

Datos de entrada

Densidad \*  
 Lb/Ft<sup>3</sup>

Z1 \*  Ft      Z2 \*  Ft

P1 \*  PSI      hL \*

Calcular

Luego el software requerirá los campos de diámetro interno, caudal y la eficiencia con la que trabajará la bomba, se da la opción de calcular y este generará los valores de la potencia de la bomba, velocidad de entrada y velocidad de carga.

Bombas 2/5

Presión de salida

P 2  
f(x)  PSI

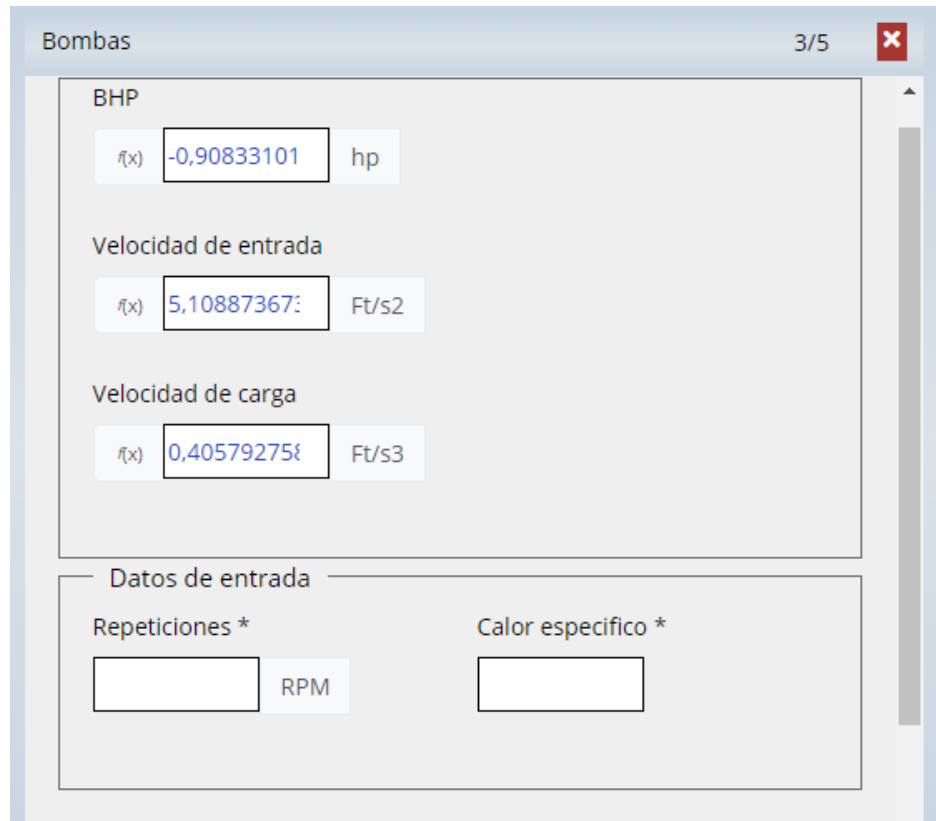
Datos de entrada

Diámetro interno \*  Pulgadas      Caudal \*  GPM

Eficiencia \*  %

Atras      Calcular

Posterior se ingresarán valores de las repeticiones y el calor específico, para determinar la altura total, incremento de la temperatura, permitiendo evaluar fenómenos térmicos que ocurren dentro del proceso de bombeo y el torque de la bomba, evaluando aspectos mecánicos.



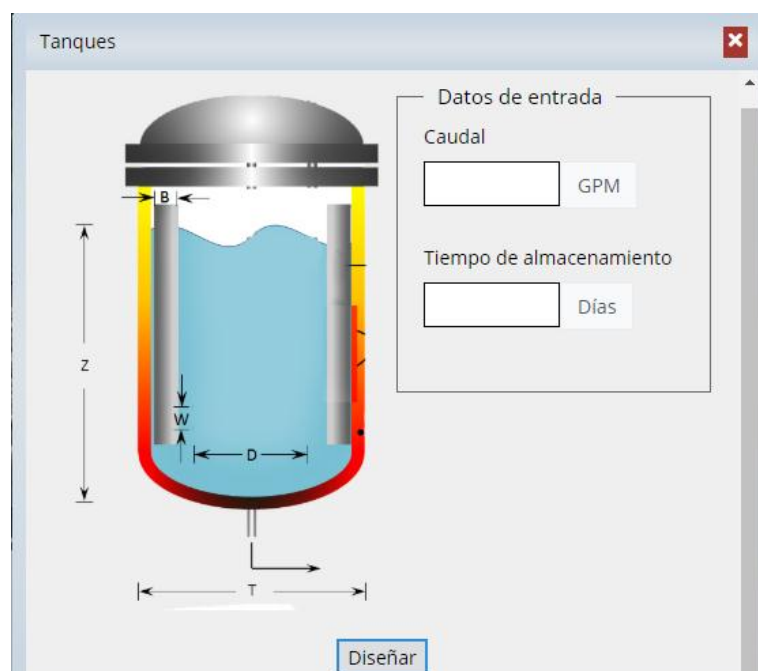
The image shows a software window titled "Bombas" with a close button in the top right corner. The window contains several input fields and labels:

- BHP**: A text box containing the value  $-0,90833101$  followed by the unit "hp".
- Velocidad de entrada**: A text box containing the value  $5,10887367$  followed by the unit "Ft/s2".
- Velocidad de carga**: A text box containing the value  $0,40579275$  followed by the unit "Ft/s3".
- Datos de entrada**: A section containing two input fields:
  - Repeticiones \***: A text box followed by the unit "RPM".
  - Calor específico \***: A text box.

Al finalizar se mostrarán los valores obtenidos, se da opción a ver un video pedagógico para entender de manera teórica lo que ocurre dentro de la bomba.



En el cuarto modulo nos encontramos con tanques, que hay que ingresar valores como caudal y tiempo de almacenamiento, se da clic en diseñar y esta muestra un recuadro con un video pedagogico, la fórmula empleada y una tabla en donde se remarcara las características comerciales que se emplearan en la creación del tanque, la capacidad del tanque, y sus correspondientes dimensiones.



Tanques

$$\text{capacidad (barriles)} = \text{GPM} * \frac{1 \text{ (barril)}}{42 \text{ (galones)}} * \frac{1440 \text{ (minutos)}}{1 \text{ (dia)}} * \text{N}^\circ \text{ dias}$$

$$\text{capacidad (barriles)} = 200 \text{ (GPM)} * \frac{1 \text{ (barril)}}{42 \text{ (galones)}} * \frac{1440 \text{ (minutos)}}{1 \text{ (dia)}} * 2 \text{ (dias)}$$

$$\text{capacidad (barriles)} = 13714.285714285714$$

| Capacidad    | Diametro     | Altura      |
|--------------|--------------|-------------|
| 1000         | 6096         | 5486        |
| 2000         | 7468         | 7315        |
| 3000         | 9144         | 7315        |
| 5000         | 9652         | 10973       |
| 10000        | 12954        | 12192       |
| <b>15000</b> | <b>17678</b> | <b>9754</b> |
| 20000        | 18288        | 12192       |

El quinto modulo es un sistema hidráulico, en donde los cálculos presentes son los mismos, con la variable que los diferentes elementos se conectaran.

Sistema Hidraulico



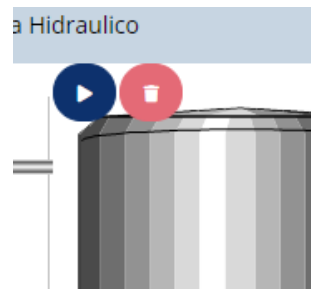
Tanque

Tubería

Perdidas menores 0

Perdidas por fricción 0

Al ingresar la tubería o un tanque, inicialmente se da doble clic sobre él y aparecerá dos botones, uno que da la opción de borrar y otro de play, que comenzará a requerir los datos y a calcular los valores deseados, posteriormente y al finalizar se da clic en guardar, para que al ingresar un nuevo elemento este por defecto tenga el valor de presión de entrada y el caudal, pues la presión de salida de un elemento es la presión de entrada del siguiente.



A medida que se vaya creando el sistema hidráulico deseado este realizara un cálculo de pérdidas menores y pérdidas por fricción, es un recuadro que se encuentra en la esquina superior derecha y esta ira mostrando en tiempo real, estos dos valores.

Tanques

Entrada  Salida

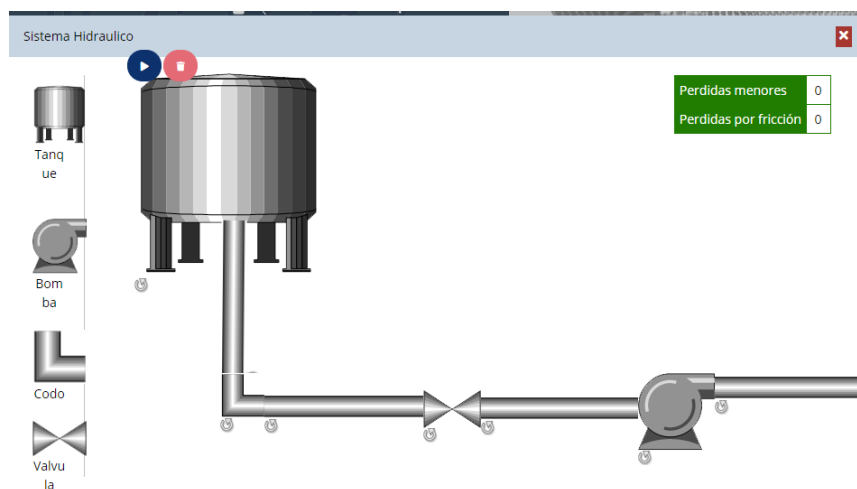
Datos de entrada

Caudal  
 GPM

Tiempo de almacenamiento  
 Días

Diseñar

HYDRA al tener elementos móviles le da la capacidad a quien emplee este software de crear un sistema hidráulico, de cualquier variante.

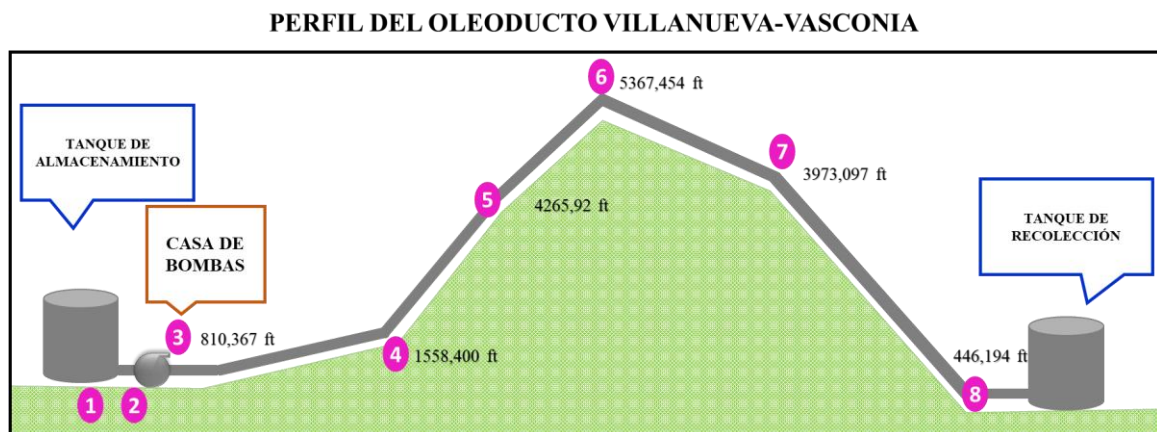


### Anexo C. Ejemplo guía del uso del software HYDRA

Tomamos el oleoducto de Villanueva - Vasconia donde se transporta un crudo con las siguientes especificaciones:

| Caracterización del crudo | Valor  | Unidad             |
|---------------------------|--------|--------------------|
| Viscosidad dinámica @86°F | 270    | cP                 |
| °API                      | 18     | NA                 |
| Gravedad especifica       | 0,9465 | NA                 |
| Densidad del crudo        | 59,09  | Lb/ft <sup>3</sup> |
| Caudal                    | 1458   | GPM                |

En la siguiente imagen se puede apreciar el perfil del oleoducto Villanueva-Vasconia:



A continuación, se muestran los datos de altura con respecto al nivel de referencia (MSNM) y las longitudes de los tramos del oleoducto.

$$Z_3 = 810,367 \text{ ft}$$

$$L_{3-4} = 91863,517 \text{ ft}$$

$$Z_4 = 1558,400 \text{ ft}$$

$$L_{4-5} = 154199,480 \text{ ft}$$

$$Z_5 = 4265,92 \text{ ft}$$

$$L_{5-6} = 246062,990 \text{ ft}$$

$$Z_6 = 5367,454 \text{ ft}$$

$$L_{6-7} = 55774,278 \text{ ft}$$

$$Z_7 = 3973,097 \text{ ft}$$

$$L_{7-8} = 239501,310 \text{ ft}$$

$$Z_8 = 446,194 \text{ ft}$$

Las tuberías usadas en este oleoducto son tuberías de 12 pulgadas de diámetro.

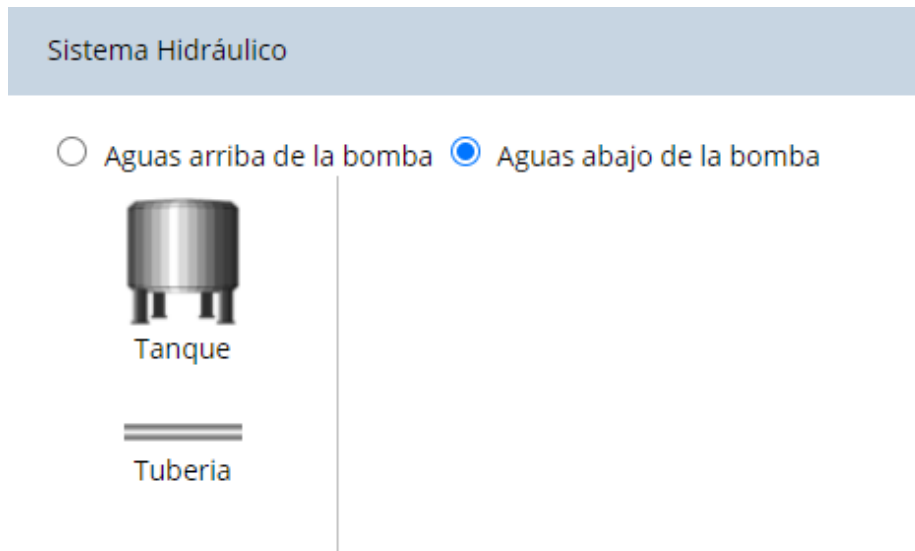
Todos los datos del fluido y del sistema fueron tomados del trabajo de grado Herrera, J. A. (2015). Diseño y elaboración del oleoducto Villanueva - Vasconia. Universidad Industrial de Santander.

El tanque de recolección en Vasconia se encuentra a presión atmosférica, con el software Hydra encontraremos las pérdidas durante todo el recorrido del oleoducto, así como la presión que debe tener el fluido al inicio del recorrido para lograr concretarlo.

Lo resolveremos usando el módulo de sistema hidráulicos:

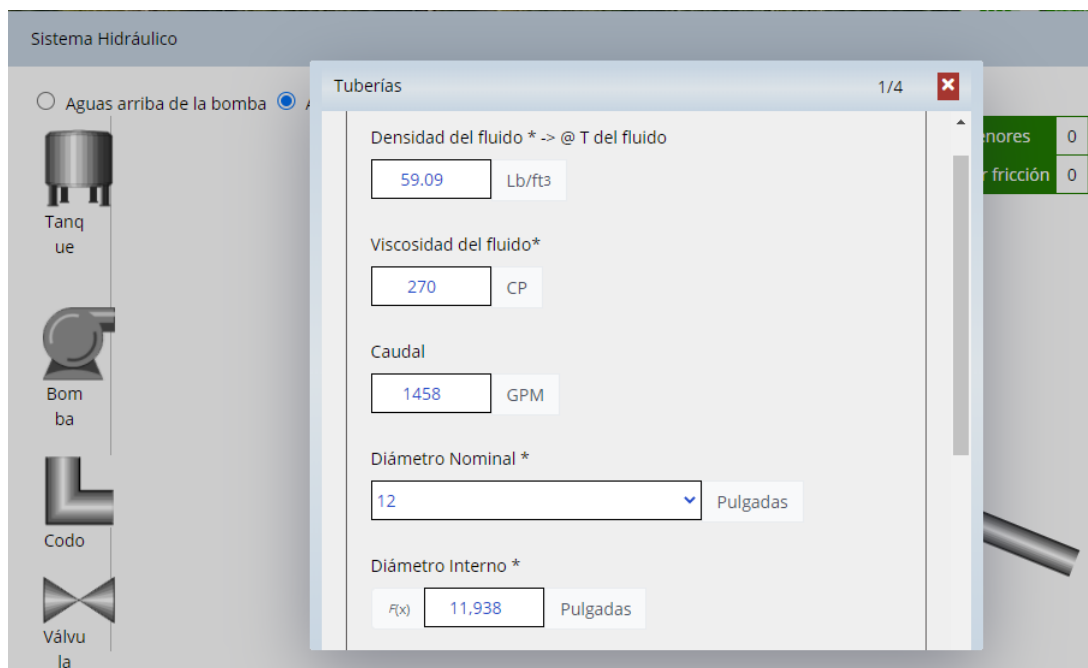


Seleccionamos la opción de aguas a bajo ya que vamos a encontrar la presión a la entrada al sistema, es decir lo que nos debe proporcionar la bomba para logra transportar el fluido.



A continuación, empezaremos a diseñar desde el tanque de recolección en la estación de Vasconia hasta la casa de bombas en Villanueva (punto 8 al 3).

Insertamos la tubería, e ingresamos los datos de esta, como se ven en la siguiente imagen:



El programa nos calculará el tipo de régimen de flujo que se presenta en la tubería, en este caso el flujo fue laminar en todo el sistema, también nos calculará las pérdidas por fricción de

la tubería, como lo muestra la siguiente imagen, si se quiere saber cómo realizo estos cálculos puede presionar F(x), que se encuentra al lado de los resultados.

The screenshot shows a dialog box titled 'Tuberías' with a progress indicator '2/4'. It contains two main sections:

- Cálculo de las pérdidas por fricción**:
  - Número de Reynolds \*:  F(x)
  - Régimen de Flujo \*:
- Pérdidas tuberías \***:
  - fm  F(x) Factor de fricción
  - hf  ft F(x)

At the bottom, it states: 'Pérdidas de energía debido a la fricción en la tubería'.

Posteriormente nos pedirá las alturas con respecto al nivel de referencia, así que las agregamos.

The screenshot shows the 'Sistema Hidráulico' software interface. A 'Tuberías' dialog box (progress '3/4') is open over a 3D pipe model. The dialog box has the following sections:

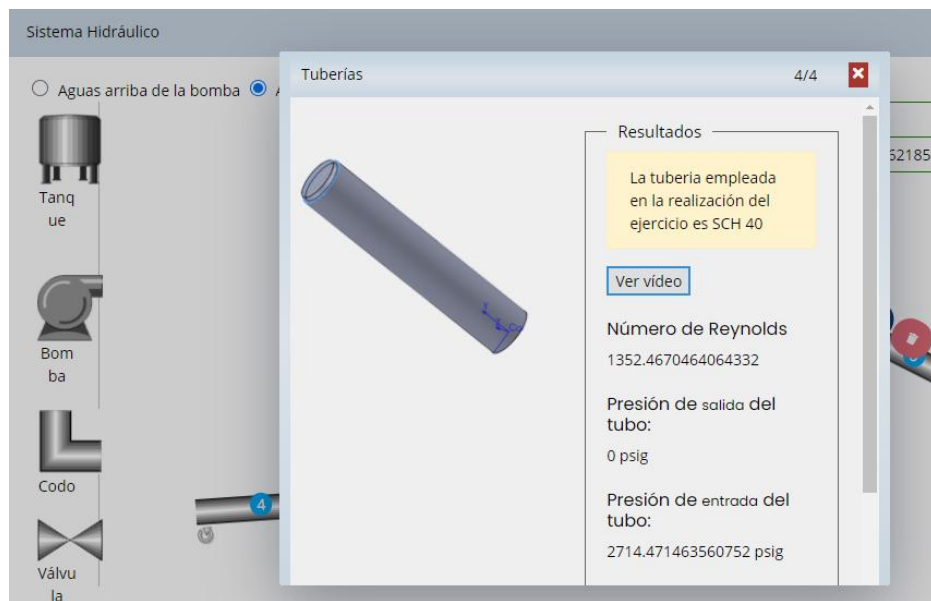
- Datos de entrada**:
  - Cálculo de presión a la entrada de la tubería**
  - Energía potencial a la entrada del tubo \*:
    - Z1  ft
    - Es la altura (longitud) a la entrada de la tubería.
  - Energía potencial a la salida del tubo \*:
    - Z2  ft
    - Es la altura (longitud) a la salida de la tubería.
  - Presión a la entrada del tubo \*:
    - P1  psig F(x)

Buttons 'Atrás' and 'Diseñar' are visible at the bottom of the dialog box.

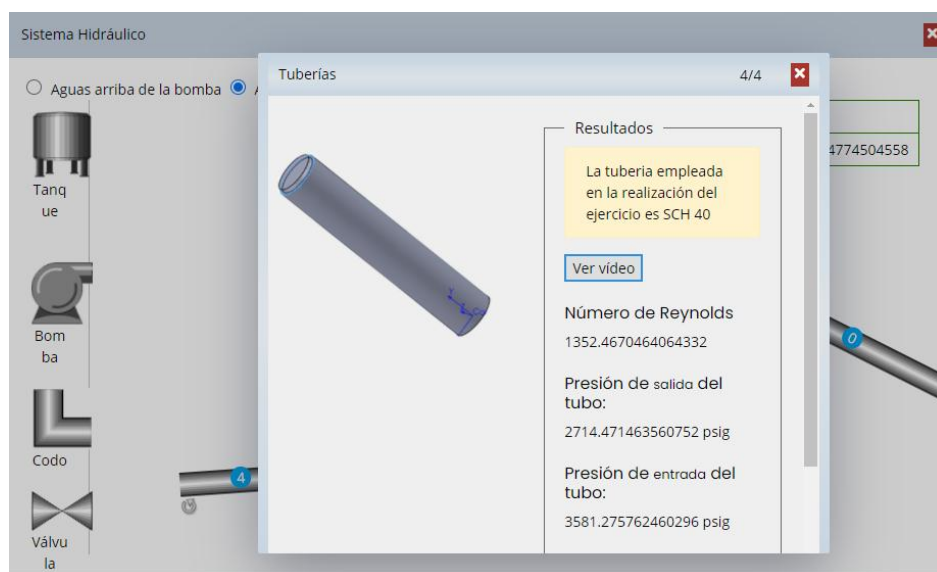
Al final de esto el programa nos permitirá conocer la presión a la entrada de este tramo de tubería, realizamos el mismo proceso para cada uno de los tramos hasta llegar a la bomba, la presión encontrada en el tramo anterior será la presión de salida de la nueva sección.

A continuación, se mostramos los resultados en cada uno de los tramos de tubería:

#### Tramo 8-7



#### Tramo 7-6:



## Tramo 6-5:

Sistema Hidráulico

Aguas arriba de la bomba  Tuberías 4/4

Tanque

Bomba

Codo

Válvula

Resultados

La tubería empleada en la realización del ejercicio es SCH 40

[Ver vídeo](#)

Número de Reynolds  
1352.4670464064332

Presión de salida del tubo:  
3581.275762460296 psig

Presión de entrada del tubo:  
5334.946296406429 psig

## Tramo 5-4

Sistema Hidráulico

Aguas arriba de la bomba  Tuberías 4/4

Tanque

Bomba

Codo

Válvula

Resultados

La tubería empleada en la realización del ejercicio es SCH 40

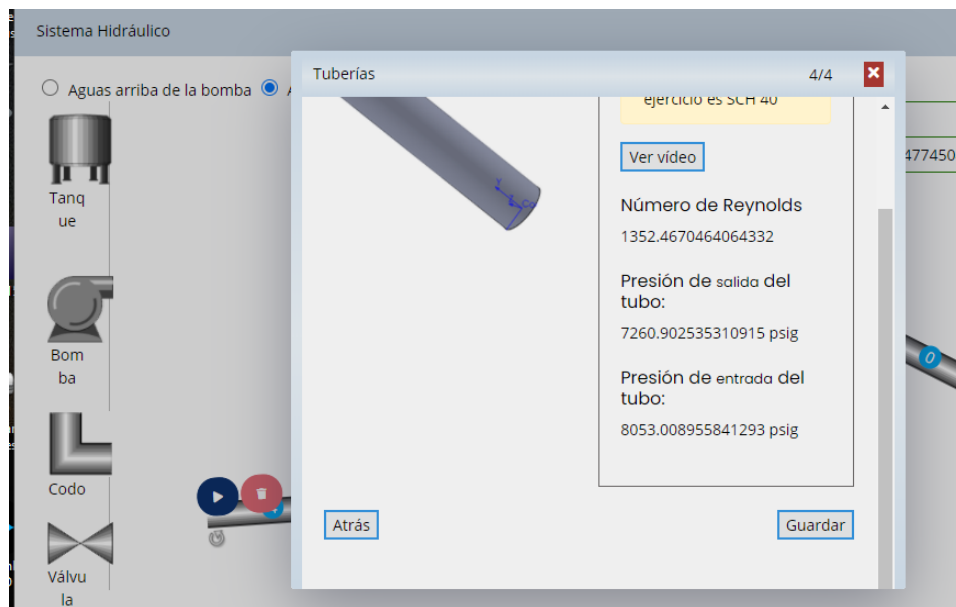
[Ver vídeo](#)

Número de Reynolds  
1352.4670464064332

Presión de salida del tubo:  
5334.946296406429 psig

Presión de entrada del tubo:  
7260.902535310915 psig

Tramo 4-3:



Así nos quedaría todo el sistema diseñado:



Como se puede ver en el cuadro es la esquina superior derecha, las pérdidas por fricción en todo el sistema fueron de 10.152,85 ft.

La presión que debe proporcionársele al fluido al inicio del recorrido para transportarlo desde la casa de bombas en Villanueva hasta el tanque de recolección en Vasconia es de 8053 psig, este dato se obtuvo de la presión de entrada de la última tubería, tramo 4-3. No se

utilizaron accesorios para diseñar este sistema ya que no se encontró referencia de ellos en el documento, las pérdidas en accesorios pueden considerarse menospreciada comparadas con las pérdidas por fricción en la tubería, por lo que se trabajó el sistema como un conjunto de tuberías.

Para saber que tan viable es proporcionar esta presión al fluido se debe realizar un análisis económico.