



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO**

TEMA:

**“SIMULACIÓN APLICADA PARA EL ANÁLISIS PREVIO DEL
COMPORTAMIENTO DEL FLUJO, DURANTE SU TRANSPORTE EN LÍNEAS DE
TUBERIA”**

PROYECTO PRÁCTICO DEL EXÁMEN COMPLEXIVO:

“TESINA”

AUTOR:

ROSA LILIANA MUÑOZ PINTO

TUTOR:

MSC. JOSÉ VILLEGAS SALABARRÍA

LA LIBERTAD – ECUADOR

2020

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO**

TEMA:

**“SIMULACIÓN APLICADA PARA EL ANÁLISIS PREVIO DEL
COMPORTAMIENTO DEL FLUJO, DURANTE SU TRANSPORTE EN
LÍNEAS DE TUBERÍA”**

PROYECTO PRÁCTICO DEL EXAMEN COMPLEXIVO

“TESINA”

AUTOR:

ROSA LILIANA MUÑOZ PINTO

TUTOR:

MSC. JOSÉ VILLEGAS SALABARRÍA

LA LIBERTAD – ECUADOR

2020



Santa Elena, 28 de septiembre 2020

CARTA DE ORIGINALIDAD

Ing. Marllelis Gutiérrez Hinestroza, PhD
Directora de la Carrera de Petróleos
Universidad Estatal Península de Santa Elena

Cumpliendo con los requisitos exigidos, envío a Uds. La Tesina Titulada “**SIMULACIÓN APLICADA PARA EL ANÁLISIS PREVIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO, DURANTE SU TRANSPORTE EN LÍNEAS DE TUBERÍA**”, para que se considere la Sustentación, señalando lo siguiente:

1. La investigación es original.
2. No existen compromisos ni obligaciones financieras con organismos estatales ni privados que puedan afectar el contenido, resultados o conclusiones de la presente Investigación.
3. Constatamos que la persona designada como autor es el responsable de generar la versión final de la investigación.
4. El Tutor certifica la originalidad de la investigación y el desarrollo de la misma cumpliendo con los principios éticos.

Autor: Rosa Liliana Muñoz Pinto

Firma:

N° de Cédula: 094037026-5

Correo: rosa.munozpinto@upse.edu.ec /mikkiro_rl1996@hotmail.com

Tutor: Msc. José Villegas Salabarría

Firma

N° de Cédula: 080249506-9

Correo: jvillegas@upse.edu.ec

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre **Carolina Pinto** y a mis abuelos **Egda Cedeño y Nelson Pinto** que siempre han estado pendientes de mí y de mi evolución, y han dedicado su vida a inculcarme valores que me convirtieron en la persona que ahora soy; y la fuerza que siempre he requerido para seguir adelante. Estoy muy segura de que, sin su apoyo, no habría conseguido ninguna de las metas que me he propuesto, sobre todo porque siempre me transmitieron la confianza que necesitaba para descubrir de lo que era capaz.

Es en honor a ellos que hoy escribo estas páginas enfocadas principalmente a transmitir todo lo que me ha sido enseñado, esperando que sirvan como una herramienta que ayude a otros jóvenes como yo, a continuar su aprendizaje hasta lograr alcanzar sus propias metas que espero sean igual o más grandes que las mías.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por nunca dejarme sola y escuchar mis plegarias todas las veces que sentí miedo de no poder más o de no ser suficiente para todo lo que soñaba, también agradezco a mi madre **Carolina Pinto**, porque definitivamente si hay un papel más grande que el del mismo Dios en el logro de mis metas es de ella, por tener tanta confianza en mí cuando ni yo misma la tenía.

El apoyo de mi familia, de mis amigos (que se convirtieron también en parte de mi familia) y de mis maestros que siempre estuvieron dispuestos a compartir su conocimiento y sus vivencias propias en donde nos dejaban claro que nada era fácil, pero rendirse no era una opción. Fueron actores principales en el alcance de mis metas y en la culminación de una etapa muy importante de mi vida. Les agradezco infinitamente por darme ese empujoncito que cualquiera necesita en algún momento de su vida en donde crees que no hay más, pero siempre hay más y aunque depende de uno mismo el seguir adelante, el saber que estaban ahí para mí siempre será algo por lo que estaré agradecida.

Por último, pero no menos importante le agradezco a **Luis Bonilla** por ser mi amigo, mi compañero y el amor de mi vida, a pesar de los altos y los bajos nunca me sentí abandonada por él y sé que el por mí tampoco, hoy estoy culminando una etapa y me da gusto saber que el formó y forma parte de ella, la vida seguirá su curso y nosotros tal vez ya no estemos tan juntos como al principio, pero el apoyo y la fuerte creencia de que aún se puede brillar más, sigue ahí. Por eso lo incluyo en estas líneas, porque todos me dieron apoyo y confianza en mí misma, pero él me dio la mano para continuar un camino que a veces ya no quería caminar, y ante esas cosas un agradecimiento no basta, pero lo convierte en la intención de luchar más, de soñar más y de siempre ser más.

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

TEMA: “SIMULACIÓN APLICADA PARA EL ANALISIS PREVIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO, DURANTE SU TRANSPORTE EN LÍNEAS DE TUBERIA”

Autor: Rosa Liliana Muñoz Pinto
Tutor: Msc. José Villegas Salabarría

RESUMEN

La presencia de dos o más fluidos moviéndose dentro de una sección transversal, puede afectar el análisis de diseño y selección de tuberías en términos de costo y de tiempo. El comportamiento inmiscible entre las fases de petróleo, agua y gas; hace que se muevan a velocidades distintas; creando diferentes patrones de flujo que requieren de antelación, para examinar el diseño y la selección de productos.

El objetivo de este proyecto es modelar la conducta del fluido, para comprender los esquemas de flujo que se forman, durante las interacciones del fluido con la tubería. La simulación fue realizada en el Software ANSYS Fluent (versión estudiantil), que permite visualizar de forma dinámica el movimiento del fluido en el tiempo. Es decir, la forma que adopta el flujo bajo determinadas condiciones de caudal, presión, temperatura y sobre todo las caídas de presión generadas por la pérdida de energía del fluido al desplazarse de un punto a otro.

La aplicación de simuladores de comportamiento, es una de las estrategias de mercado más efectivas para implementar análisis de sistemas complejos; como lo es la presencia de flujos multifásicos en tuberías. Este proceso es llevado a cabo bajo un estudio de optimización basado en la variación del diámetro de tubería, para analizar las pérdidas de carga y de presión que menores riesgos representen; y determinar un diámetro óptimo de trabajo, que soporte la separación de las fases.

Palabras clave: Comportamiento del flujo de fluidos, flujo multifase, simulación, diámetro óptimo.

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEO

TITLE: “SIMULACIÓN APLICADA PARA EL ANALISIS PREVIO DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO, DURANTE SU TRANSPORTE EN LÍNEAS DE TUBERIA”

Autor: Rosa Liliana Muñoz Pinto
Tutor: Msc. José Villegas Salabarría

ABSTRACT

The presence of two or more fluids moving within a cross section can affect pipeline selection and design analysis in terms of cost and time. The immiscible behavior between the oil, water and gas phases; makes them move at different speeds; creating different flow patterns that require advance, to examine design and product selection.

The objective of this project is to model the behavior of the fluid, to understand the flow patterns that are formed during the interactions of the fluid with the pipe. The simulation was carried out in the ANSYS Fluent Software (student version), which allows to dynamically visualize the movement of the fluid in time. That is, the shape that the flow takes under certain conditions of flow, pressure, temperature and especially the pressure drops generated by the loss of energy of the fluid when moving from one point to another.

The application of behavior simulators is one of the most effective market strategies to implement complex systems analysis; as is the presence of multiphase flows in pipes. This process is carried out under an optimization study based on the variation of the pipe diameter, to analyze the head and pressure losses that represent the lowest risks; and determine an optimal working diameter, which supports the separation of the phases.

Keywords: Fluid flow behavior, multiphase flow, simulation, optimal diameter.

ÍNDICE TEMÁTICO

CARTA DE ORIGINALIDAD.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VI
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
Antecedentes.....	3
Justificación.....	4
Objetivos.....	5
CAPITULO II	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Propiedades físicas de los fluidos.....	6
2.2 Flujo de fluidos en tuberías	12
2.3 Patrones de flujo en tuberías.....	26
2.4 Selección de Tuberías.....	29
CAPITULO III.....	33
METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	33
3.1 Tipo de investigación y descripción del modelo	33
3.2 Diseño del modelo conceptual.....	33
3.3 Modelos matemáticos disponibles en ANSYS Fluent, para la simulación de flujo multifásico	37
3.4 Recopilación de datos	39
3.5 Construcción del modelo	42
3.6 Verificación y validación.....	44
CAPITULO IV	46
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	46
4.1 Implementación del modelo VOF	46
4.2 Análisis y Discusión de las variables	48

4.3	Análisis Económico.....	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		58
5.1	Conclusiones.....	58
5.2	Recomendaciones.....	58
BIBLIOGRAFÍA.....		60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Balance de energía, Teorema de Bernoulli.	13
Figura 2 Caída de presión por elevación	15
Figura 3 Origen de las caídas de presión por aceleración.....	16
Figura 4 Diagrama de Moody.....	19
Figura 5 Tubería cilíndrica por donde circula un fluido newtoniano	21
Figura 6 Patrones de Flujo en tubería vertical	28
Figura 7 Patrones de flujo en tubería horizontal.....	29
Figura 8 Región tubular de flujo de un fluido discreto.....	35
Figura 9 Esquema de implementación para la simulación en ANSYS Fluent	36
Figura 10 Geometría de una sección de tubería.....	43
Figura 11 Mallado Hexagonal	43
Figura 12 Setup del simulador	44
Figura 13 Configuración del modelo multifásico	47
Figura 14 Patrones de flujo, según la densidad gas/líquido.....	50
Figura 15 Distribución de velocidad. (a) D: 2in, (b) D: 3in, (c) D: 4in	52
Figura 16 Distribución de presión en la tubería. (a) D: 2in, (b) D: 3in, (c) D: 4in	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factor de Fricción según el régimen de flujo	17
Tabla 2 Rugosidad de la Tubería	18
Tabla 3 Reducción de temperatura para componentes sin aislamiento	31
Tabla 4 Datos de entrada de la tubería.....	40
Tabla 5 Propiedades del fluido	40
Tabla 6 Coeficientes de pérdidas menores.....	41
Tabla 7 Análisis de ANSYS Fluent	49
Tabla 8 Datos de entrada para llevar a cabo análisis económico.....	54

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de los fluidos juega un papel importante para los procesos de ingeniería en general y constituye uno de los fundamentos más relevantes para el estudio de las operaciones unitarias. Suponer la conducta de los fluidos en movimiento no suele ser algo sencillo; lo que conlleva a que predecir el impacto que provocaran en los productos (tuberías) y procesos sea complicado, sobre todo porque el comportamiento del fluido depende mucho del medio en donde fluye y de las propiedades del mismo, por ejemplo; cuando un fluido viscoso circula por una tubería horizontal uniforme, la presión a lo largo de una línea de flujo disminuye al contrario de lo que ocurre en un fluido perfecto.

Por ello, es necesario obtener una visión precisa de los fenómenos que ocurren en los productos, para garantizar su seguridad, fiabilidad y longevidad. A esta necesidad, incurre la idea de disponer de un sistema capaz de modelar el comportamiento fluido-estructura, para comprender la acción de los fluidos cuando ejercen una presión y/o cargas térmicas sobre dicha estructura, pues estas cargas inducen en el sistema deformaciones estructurales lo suficientemente significativas como para cambiar el flujo de fluidos en sí, y transmitir efectos no deseados.

Este proyecto aplica modelos de simulación para considerar los distintos escenarios posibles, que nos ayuden a predecir, comparar y optimizar el comportamiento del proceso en un tiempo breve, sin el coste ni el riesgo de llevarlo a cabo.

Asistir a la ingeniería con métodos computacionales es una herramienta que resulta de mucha ayuda para las empresas del sector petrolero y demás. Con este apoyo, los profesionales pueden realizar diferentes análisis que brinden beneficios en la reducción de costos y de tiempo, lo que constituirá a un mayor alcance de productividad y facilidad para la detección de errores.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La mayoría de las aplicaciones relacionadas con la Mecánica de Fluidos se ven en la obligación de determinar el actuar de un fluido en movimiento, puesto que es fundamental para evitar daños que afecten el sistema. Por ello, es preciso saber describir el comportamiento de los fluidos cuando su estado estacionario se ve alterado.

Un fluido cambia de forma, de manera continua cuando está sometido a un esfuerzo cortante, por muy pequeño que sea éste, es decir, un fluido no es capaz de soportar un esfuerzo cortante sin moverse durante ningún intervalo de tiempo. Estudios relacionados mencionan que las perturbaciones que se presentan en el flujo pueden ser amortiguadas rápidamente en el denominado flujo laminar. Sin embargo, si la velocidad del fluido se hace lo suficientemente grande, el movimiento del fluido se vuelve sensible a cualquier perturbación y si estas se amplifican, el flujo entonces pasa a ser irregular y pierde su carácter estacionario (Domingo, 2011).

El flujo turbulento es uno de los fenómenos principales a tomar en cuenta. Este interés estriba en que los movimientos del fluido turbulento se presentan de forma muy común en la naturaleza y en las aplicaciones de ingeniería; modificando de forma significativa parámetros como la resistencia a la fricción, la trasmisión de calor o la capacidad de la mezcla. Del mismo modo, cuando un fluido se ve obligado a cambiar de dirección o viajar alrededor de una interrupción, se producen en él remolinos de torsión que interfieren con el patrón de flujo y producen pérdidas de presión adicionales o anomalías como la cavitación y el “golpe de ariete” (Zhukovski, 2020); que representa un aumento repentino de la presión causado por un cambio brusco de la velocidad en el caudal de la tubería. De allí el requerimiento de un diseño e instalación correctos del sistema de tuberías, que minimice estas pérdidas.

Antecedentes

La Mecánica de Fluidos estudia las leyes del movimiento de los fluidos y sus procesos de interacción con los cuerpos sólidos para definir así su comportamiento. La Mecánica de Fluidos como hoy la conocemos es una mezcla de teorías y experimentos que provienen por un lado de los trabajos iniciales de los ingenieros hidráulicos, de carácter fundamentalmente empírico, y por el otro del trabajo de básicamente matemáticos, que abordaban el problema desde un enfoque analítico. Al integrar en una única disciplina las experiencias de ambos colectivos, se evita la falta de generalidad derivada de un enfoque estrictamente empírico, y al mismo tiempo se permite que los desarrollos analíticos - matemáticos aprovechen adecuadamente la información experimental, y eviten basarse en simplificaciones artificiales alejadas de la realidad (Domingo, 2011).

El manejo de los fluidos en superficie provenientes de un yacimiento de petróleo o gas, demandan de la aplicación de conceptos básicos relacionados con el flujo de fluidos en tuberías, en sistemas sencillos o en redes de tuberías, requieren también el uso de válvulas, accesorios y técnicas necesarias para diseñar y especificar equipos utilizados en operaciones de superficie (Academia).

La simulación por ordenador ha intentado modelizar sistemas reales o hipotéticos de forma que las variables de funcionamiento puedan ser estudiadas, al lograr predecir su comportamiento. La historia y la evolución de la simulación por ordenador, han ido paralelas a la evolución de la Informática; sus orígenes se remontan a la segunda Guerra Mundial, cuando dos matemáticos; J. V. Neumann y S. Ulam, asumieron el reto de resolver un problema complejo relacionado con el comportamiento de los neutrones. Los experimentos basados en prueba y error proponían muchos gastos, y el problema era demasiado complicado para abordarlo mediante técnicas analíticas. La aproximación que adoptaron se basa en la utilización de números aleatorios y distribuciones de probabilidad, lo llamaron, el “Método de Montecarlo” por la similitud que mostraba la generación de números aleatorios con el juego de la ruleta. Se puede decir que la informática se convirtió en un instrumento básico, que ha permitido y permitirá seguir avanzando en el campo de la simulación.

Justificación

Este proyecto busca analizar cómo se comporta un fluido (gas, petróleo o agua) mientras viaja por los sistemas de tuberías, con el fin de estipular oportunidades que resulten clave, para la optimización en diseños rentables. Debido a que el proceso de descarga estará sujeto a variaciones que podrían alterar todo el sistema de flujo (intervención de variables físicas y mecánicas) o dañarlo por completo. Por ello efectuar simulaciones que nos ayuden a verificar las condiciones que se desarrollan en el sistema, resulta una opción bastante útil para evaluar cómo el mismo, podría ser más eficiente y duradero.

Aunque muchas industrias se ven relacionadas con el flujo de fluidos, este proyecto se direcciona totalmente a la industria del petróleo. Puesto que la modelación confiable del comportamiento de los fluidos incide como una necesidad común para esta área. Promoviendo que se mejore el diseño de las instalaciones de superficie, y se reduzca la brecha que existe entre las operaciones reales y las condiciones de simulación, para evitar que ocurran problemas posteriores que podrían terminar afectando incluso el ambiente, esto a su vez, se deriva en la optimización de tiempo y dinero.

Objetivos

Objetivo General

Modelar el comportamiento de los fluidos al transportarse por los sistemas de tuberías con el uso de herramientas CFD (dinámica de fluidos computacional), que contribuyan al proceso de análisis para la optimización y diseño de productos.

Objetivos Específicos

- Redactar las variables que componen la mecánica de fluidos
- Analizar los patrones de flujo y las características del flujo multifase en una tubería transversal.
- Determinar un diámetro óptimo de diseño.
- Examinar los beneficios costo-tiempo que implica el análisis previo del transporte de fluidos con el uso de la simulación.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

Al ser el petróleo una fuente de energía clave para el desarrollo económico del país, es común que este genere expectativas en cuanto a la productividad que se pueda obtener de él.

Aspectos como la calidad del crudo, la composición, la cantidad del mismo, y la complejidad de las operaciones, entre otros factores, precisan del diseño de estrategias que permitan contribuir a la máxima producción posible de crudo. Siendo allí, donde los estudios llevados a cabo para modelar el comportamiento del petróleo y la mezcla de este con otros componentes, contribuyen en gran medida a crear una idea clara sobre el comportamiento real del flujo.

2.1. Propiedades físicas de los fluidos

Así como la presión y la temperatura son variables que definen un diagrama de fases, existen también una serie de variables interrelacionadas que permiten predecir y cuantificar el flujo de fluidos, las cuales pueden ser interrelacionadas para obtener datos de una mezcla que supondrá características propias. (Domingo, 2011).

2.1.1 Propiedades del Petróleo

Las propiedades estudiadas para el petróleo incluyen la solubilidad del gas, factor volumétrico del petróleo, la viscosidad y la compresibilidad.

- a) **Solubilidad del gas (Rs).** - Volumen de gas disuelto por barril de crudo a condiciones de presión y temperatura, en caso de ser estándar (14,7 psia y 60 °F respectivamente) se define como la relación gas-petróleo (GOR). La solubilidad del gas permanece constante a presiones por encima de la presión de burbuja. El Rs declina cuando la presión disminuye, por debajo del punto de burbuja.

$$R_s = \gamma_g \frac{P}{18,2} + 1,4 * \frac{10^{0,0125 * API^{1,2048}}}{10^{0,00091T}}$$

Donde:

γ_g : Gravedad específica del gas

API : Grados API del crudo

T : Temperatura ($^{\circ}F$)

P : Presión (psia)

La solubilidad del gas se usa con frecuencia para cálculos volumétricos del petróleo y gas.

- b) **Densidad del petróleo (ρ_o)**.- Se define como la masa por unidad de volumen en (lb/ft^3). Debido al contenido de gas, la densidad del petróleo es dependiente de la presión. La densidad del petróleo en condiciones estándar se conoce como la gravedad API, y su respectiva relación con la densidad en el tanque de almacenamiento es:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\gamma_o} - 131,5$$

Donde:

γ_o : Gravedad específica del petróleo

Para el cálculo de la densidad a presiones y temperaturas elevadas, Ahmed propuso la siguiente correlación:

$$\rho_o = \frac{62,4\gamma_o + 0,0136R_s\gamma_o}{0,972 + 0,000147R_s\frac{\bar{\gamma}_g}{\gamma_o} + 1,25T^{1,175}}$$

- c) **Factor volumétrico (B_o)**. - El factor volumétrico del petróleo se define como el volumen ocupado en el yacimiento a la presión y temperatura de yacimiento por unidad de volumen de crudo en las condiciones de almacenamiento en superficie más el gas disuelto:

$$B_o = 0,9759 + 0,00012R_s\frac{\bar{\gamma}_g}{\gamma_o} + 1,25^{1,2}$$

Siempre es mayor que uno, debido a que el crudo disuelve más gas en condiciones de yacimiento que en condiciones de almacenamiento. A una determinada temperatura en el yacimiento, B_o permanece relativamente constante a presiones por encima de la

presión de burbuja. El factor volumétrico desciende cuando la presión disminuye por debajo de la presión de burbuja.

- d) **Viscosidad del petróleo (μ_{od}).**- Es un parámetro empírico usado para la descripción de la resistencia al flujo de un fluido. La viscosidad del petróleo es de interés en la entrada al pozo y cálculos hidráulicos en producción:

$$\mu_{od} = 0,32 + \frac{1,8 * 10^7}{API^{4,53}} \frac{360^A}{T + 200} \quad (cp)$$

Donde:

$$A = 10^{0,43 + \frac{8,33}{API}}$$

- e) **Compresibilidad (C_o).** - La compresibilidad se define como la variación del volumen con la presión a temperatura constante. Para su cálculo se usa la correlación empírica desarrollada por Vázquez y Beggs:

$$C_o = \frac{-1433 + 5R_s + 17,2T - 1180\gamma_{g100} + 12,61\gamma_{API}}{10^5 P}$$

Donde:

$$\gamma_{g100} = \gamma_g 1,0 + 5,912 * 10^{-5} \gamma_{API} T \log \frac{P}{114,7} :$$

Gravedad específica del gas a una presión de 100 psia.

2.1.2 Propiedades del Gas Natural

Las propiedades estudiadas incluyen la gravedad específica, la presión y temperaturas pseudo críticas, factor de compresibilidad, la densidad del gas, el factor volumétrico y la compresibilidad del gas.

- a) **Gravedad específica (γ_g):** La relación entre el peso molecular del gas y la del aire se conoce como gravedad específica. Conocida la composición del gas con sus componentes y sus respectivas fracciones molares, el peso molecular aparente del gas se puede calcular usando la regla de las mezclas de gases ideales.

$$MW_g = \sum_{i=1}^n Y_i MW_i$$

Donde MW_i es el peso molecular del componente i , y n es el número de componentes presentes en el gas. Definido el peso molecular del gas, la gravedad específica es:

$$\gamma_g = \frac{MW_g}{28,97}$$

- b) **Presión y temperatura pseudo crítica.** - De forma similar al cálculo del peso molecular del gas, se pueden determinar las propiedades críticas del gas basándose en las propiedades críticas de los componentes individuales y de la regla de las mezclas de gases ideales.

Para la presión pseudo crítica:

$$P_{sc} = \sum_{i=1}^n y_i P_{ci}$$

Y para la temperatura pseudo crítica:

$$T_{sc} = \sum_{i=1}^n y_i T_{ci}$$

Donde P_{ci} y T_{ci} son las presiones y temperaturas críticas del componente i respectivamente.

En algunos casos la composición del gas no es conocida, para tal caso disponiendo de la gravedad específica T_{sc} y P_{sc} se calculan con:

$$P_{sc} = 709,604 - 58,718\gamma_g$$

$$T_{sc} = 170,491 - 307,344\gamma_g$$

- c) **Viscosidad del gas (μ_g):** Al igual que el petróleo, la viscosidad del gas puede ser determinada en cartas o por medio de correlaciones. La correlación de Carr involucra un cálculo en dos pasos. Primero se calcula la viscosidad a presión y temperatura atmosférica a partir de la gravedad específica y parte de la composición del gas. Luego se ajusta el valor obtenido a las condiciones de presión reales por medio de un factor de corrección basado en la temperatura y presión reducida del gas:

$$\mu_1 = \mu_{1H} + \mu_{1N_2} + \mu_{1CO_2} + \mu_{1H_2S}$$

Donde:

μ_1 : Viscosidad a presión atmosférica

$$\mu_{1HC} = 8,188 * 10^{-3} - 6,15 * 10^{-3} \log \gamma_g + 1,709 * 10^{-5} - 2,06201 * 10^{-6} \gamma_g T$$

$$\mu_{1N_2} = 89,59 * 10^{-3} + 8,48 * 10^{-3} \log \gamma_g \gamma_{N_2}$$

$$\mu_{1CO_2} = 6,24 * 10^{-3} + 9,08 * 10^{-3} \log \gamma_g \gamma_{CO_2}$$

$$\mu_{1H_2S} = 3,73 * 10^{-3} + 8,49 * 10^{-3} \log \gamma_g \gamma_{H_2S}$$

$\gamma_{N_2}, \gamma_{CO_2}, \gamma_{H_2S}$: son las fracciones molares de los gases y (T) la temperatura de la mezcla en (°F).

d) **Factor de compresibilidad (Z).** - También conocido como el factor de desviación del comportamiento de un gas ideal. Comúnmente el factor Z se estima basado en la carta de Standing y Karts. La correlación que desarrollaron Beggs y Brill, basada en un código de cálculo lo suficientemente exacto para la mayoría de cálculos de ingeniería:

$$A = 1,39(T_{pr} - 0,92)^{0,5} - 0,36T_{pr} - 0,10$$

$$B = 0,62 - 0,23T_{pr} P_{pr} + \frac{0,066}{T_{pr} - 0,86} - 0,037P_{pr}^2 + \frac{0,32P_{pr}^6}{10^E}$$

$$C = 0,132 - 0,32 \log T_{pr}$$

$$D = 10^F$$

$$E = 9 T_{pr} - 1$$

$$F = 0,3106 - 0,49T_{pr} + 0,1824T_{pr}^2$$

Y para Z, se tiene:

$$Z = A + \frac{1 - A}{e^B} + C * P_{pr}^D$$

e) **Densidad del gas (ρ_g).**- Debido a que el gas es compresible, su densidad depende de la presión y la temperatura. Tomando aire con un peso molecular de 28,97; la densidad puede escribirse de la siguiente forma

$$\rho_g = \frac{2,70P\gamma_g}{ZT}$$

Donde:

ρ_g : Densidad del gas, lbm/ft³

z: Factor de compresibilidad del gas

T: Temperatura (°R)

P: Presión (psi)

- f) **Factor volumétrico (Bg).** - El factor volumétrico del gas se define como la relación entre el volumen del gas en condiciones del yacimiento, respecto al volumen del gas en condiciones estándar:

$$B_g = 0,005405 \frac{ZT}{P}$$

- g) **Compresibilidad del gas (Co).** - La compresibilidad de un gas es una medida del cambio del volumen relativo como respuesta al cambio de presión, y se define como:

$$C_g = \frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dP}$$

2.1.3 Propiedades del Agua

Además de las propiedades físicas del agua, son de particular interés la solubilidad del gas, el factor volumétrico, la viscosidad, la tensión superficial y la compresibilidad.

- a) **Densidad del agua (ρ_w).**- En condiciones estándar la densidad del agua es de 62,4 lb/ft³. Despreciando la solubilidad del gas en el agua, la densidad se puede escribir como:

$$\rho_w = \frac{62,4 \text{ lbm}}{B_w \text{ ft}^3}$$

- b) **Solubilidad del gas en el agua (Rsw).** - La solubilidad de los gases hidrogenados en agua es inversamente proporcional al peso molecular. Ahmed sugiere el uso de la siguiente correlación:

$$R_{sw} = A + BP + CP^2$$

Donde:

$$A = 2,12 + 3,45 * 10^{-3}T - (3,59 * 10^{-5})T^2$$

$$B = 0,0107 + 5,26 * 10^{-5}T - (1,48 * 10^{-7})T^2$$

$$C = 8,75 * 10^{-7} + 3,9 * 10^{-9}T - (1,02 * 10^{-11})T^2$$

- c) **Factor volumétrico del agua (Bw).** - Debido a que la solubilidad del gas en el agua es baja comparada con la del petróleo, una práctica común es despreciar la compresibilidad y la solubilidad del gas en el agua. En las situaciones actuales de campo, el agua contiene gas en solución y de esta forma, se hincha bajo una reducción de presión. Gould, propone la siguiente correlación empírica para determinar Bw:

$$B_w = 2,0 + 1,2 * 10^{-4}T + 1,0 * 10^{-6}T^2 - 3,33 * 10^{-6}P \left(\frac{bbl}{stbw} \right)$$

Con T en (°F) y P en (psia).

- d) **Viscosidad (μ_w).**- La viscosidad del agua aumenta con la presión y los sólidos disueltos, y disminuye con la solubilidad del gas. Van Winger presento una correlación para la viscosidad del agua dependiente de la temperatura:

$$\mu_w = \exp (1,003 - 1,479 * 10^{-2}T + 1,982 * 10^{-5}T^2)$$

2.2. Flujo de fluidos en tuberías

El estudio del flujo de fluidos en tuberías, se apoya en la obtención de tres parámetros de que determinen el diseño y posterior construcción de las redes de tubería.

- Caída de presión Δp_T a lo largo de la tubería
- El diámetro óptimo de la tubería, capaz de soportar el gasto requerido según la caída de presión y las pérdidas de carga.

Ecuación general para el balance de energía

La base teórica para la mayoría de las ecuaciones de flujo de fluidos es el equilibrio energético.(Beggs, 1991). En este capítulo se detalla la ecuación para balance de energía, desarrollada en términos termodinámicos, para luego ser modificada a una forma de ecuación de gradiente de presión.

$$U'_1 + p_1V_1 + \frac{mv_1^2}{2g_c} + \frac{mgZ_1}{g_c} + q' + W'_s = U'_2 + p_2V_2 + \frac{mv_2^2}{2g_c} + \frac{mgZ_2}{g_c}$$

Donde:

U' : Energía interna

pV : Expansión o compresión de energía

$mv^2/2g_c$: Energía cinética

mgZ/g_c : Energía potencial

q' : Energía térmica añadida al fluido

W'_s : Trabajo realizado en el fluido por el entorno

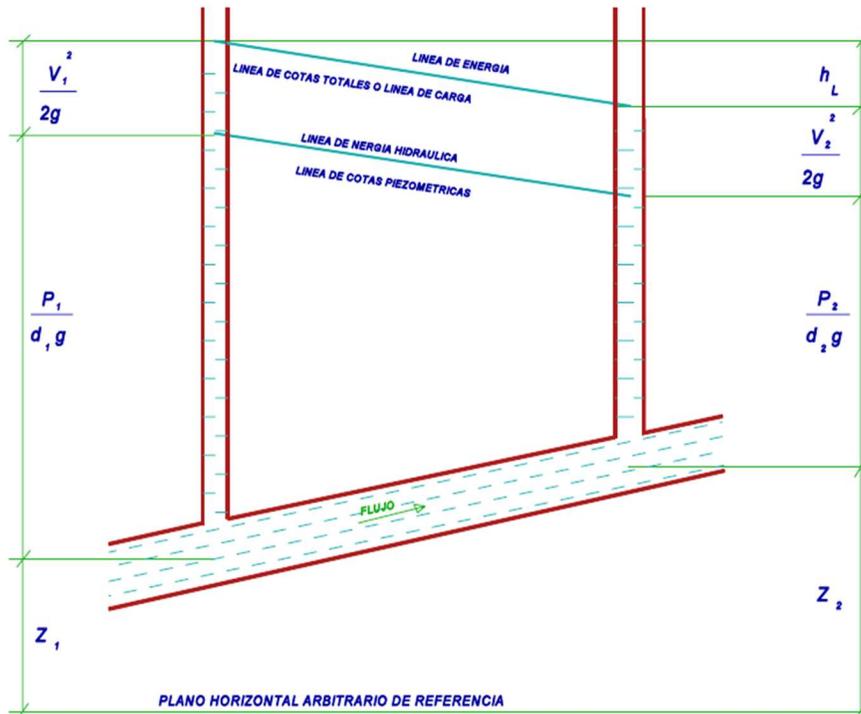


Figura 1 Balance de energía, Teorema de Bernoulli.
Fuente: (Acta Académica)

Dividiendo la ecuación para m , obtendremos un balance de masa por unidad de energía:

$$dL' + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{v dv}{g_c} + \frac{g}{g_c} dZ + dq + dW_s = 0$$

Y aplicando las relaciones termodinámicas, ($S = \text{entropía}$):

$$T dS + \frac{dp}{\rho} + \frac{v dv}{g_c} + \frac{g}{g_c} dZ + dq + dW_s = 0$$

La ecuación de balance de energía también puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_T = \left(\frac{dp}{dL}\right)_e + \left(\frac{dp}{dL}\right)_{ac} + \left(\frac{dp}{dL}\right)_f$$

Donde:

$\left(\frac{dp}{dL}\right)_T$: Caída de Presión Total

$\left(\frac{dp}{dL}\right)_e$: Caída de Presión por elevación

$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{ac}$: Caída de Presión por aceleración

$\left(\frac{dp}{dL}\right)_f$: Caída de Presión por fricción

Es importante analizar cada uno de estos términos para determinar la relevancia que tendrán en el movimiento de los fluidos a través de tuberías.

Caídas de presión por elevación

Siempre que ocurra un cambio de elevación o inclinación de la tubería con respecto al plano horizontal, los efectos gravitacionales producirán un cambio en la presión. (Ávalos, 2013). Que puede ser expresado como:

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_e = \left(\frac{g}{g_c}\right) \rho \sin \theta$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido

θ : Angulo de inclinación al plano horizontal

g : Aceleración de gravedad

g_c : Constante numérica igual al valor de “g”

Si la densidad es considerada como constante a lo largo de la tubería

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_e = 0.00694\rho L \sin \theta$$

Donde:

ρ : Densidad del líquido constante o densidad promedio del vapor (lb/ft³)

L : Longitud de la sección de inclinación de la tubería (ft)

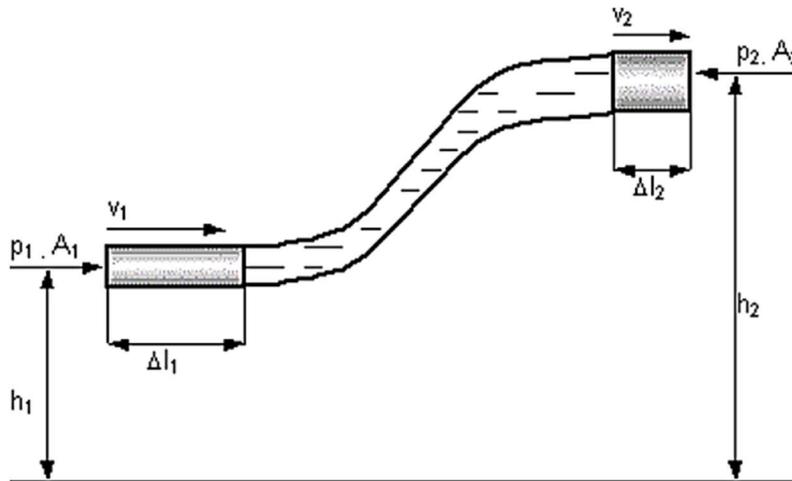


Figura 2 Caída de presión por elevación

Fuente: (Ávalos, 2013)

Solo en el caso de los gases, las pérdidas por elevación no representan un porcentaje significativo de la caída total de presión.

Caídas de presión por aceleración

Son muy importantes para el flujo multifásico debido a que el gas que normalmente fluye a mayor velocidad que el aceite, provoca que la fase líquida vaya incrementando su velocidad debido a la transferencia de energía cinética, es decir que el flujo de gas

acelera al líquido, lo cual; al ocurrir de forma constante ocasiona una caída extra de presión en la tubería por aceleración.

$$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{ac} = \rho v \frac{dv}{dL}$$

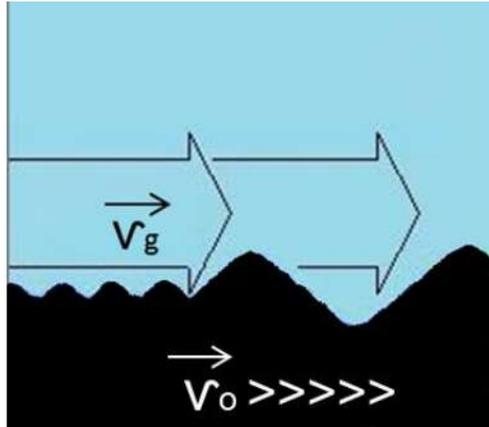


Figura 3 Origen de las caídas de presión por aceleración
Fuente: (Ávalos, 2013)

Caídas de presión por fricción

También llamadas pérdidas de carga, representan el gradiente de presión ocasionado por el cizallamiento viscoso del contacto del fluido con la tubería. Existen diversas ecuaciones para calcular las pérdidas de presión por fricción. La más usada es la ecuación de Darcy:

$$\Delta h = \left(\frac{dp}{dL}\right)_f = \frac{f \rho v^2}{2g_c d}$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido (lb/ft³)

f : Factor de fricción (adim.)

v : Velocidad del fluido (ft/s)

d : Diámetro (ft)

g_c : constante de la segunda ley de Newton = $32.2 \frac{lb_m * ft}{lb_f * s^2}$

En el flujo de tubería horizontal, las pérdidas de energía o la caída de presión se deben únicamente al cambio en la energía cinética y las pérdidas por fricción. Dado que la mayor parte del cizallamiento viscoso se produce en la pared de la tubería.

Factor de fricción

Dependiendo del régimen de flujo, las fuerzas de rozamiento que aparecen en el sistema serán de distintos tipos.

- **Régimen laminar o de Poiseuille:** El régimen del flujo es laminar cuando el flujo tiene un movimiento ordenado, debido a que las velocidades presentes son relativamente bajas y las partículas del fluido se mueven en líneas paralelas, sin producirse una mezcla entre las distintas capas.
- **Régimen turbulento o de Venturi:** El régimen de movimiento de un fluido es turbulento cuando el fluido presenta un movimiento irregular e indeterminado con mezcla intensiva entre las distintas capas.

En el caso del régimen laminar, las fuerzas que se ejercen entre las distintas capas del fluido son tangentes a la dirección del movimiento. Por el contrario, en el régimen turbulento aparece una segunda contribución a la fuerza de rozamiento debida a la mezcla entre las distintas capas. (Domingo, 2011).

Tabla 1 Factor de Fricción según el régimen de flujo

Régimen	Coefficiente de fricción (f)	Dependencia
Laminar	$f = \frac{64}{Re}$	$f = f(Re)$
Turbulento Liso	$f \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right)$	$f = f(Re)$
Turbulento Intermedio	$f \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 * \log\left(\frac{6,9}{Re} \left(\frac{\epsilon_\gamma}{3,7}\right)^{1,11}\right)$	$f = f(Re, \epsilon_\gamma)$
Turbulento Rugoso	$f \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{\epsilon_\gamma}{3,7}\right)$	$f = f(\epsilon_\gamma)$

Para estudios técnicos:

- Si $Re < 2000$ el flujo es considerado laminar

- Si $R_e > 4000$ el flujo se considera turbulento.

En flujos turbulentos es necesario tomar en cuenta el factor de rugosidad (ϵ/d) cuyos valores, se aplican para los distintos tipos de tuberías.

Tabla 2 Rugosidad de la Tubería

TIPO DE TUBERÍA	RUGOSIDAD (mm)	RUGOSIDAD (in)
Concreto	0,3 – 3	0,012 – 0,12
Hierro dúctil	0,254	0,01
Hierro galvanizado	0,15	0,006
Acero	0.04572	0,0018
Acero bridado	0,9-9	0,035-0.35
PVC	0,0015	0,00006

Número de Reynolds

Relaciona la fuerza de inercia y fuerza de viscosidad. Para calcular el número de Reynolds se presenta la siguiente ecuación:

$$R_e = \frac{\rho * D * v}{\mu}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

ρ : Densidad (lb/ft³)

D : Diámetro ID, ft

V : Velocidad de flujo (ft/seg)

μ : Viscosidad (lb/ft*seg)

Para gases se utiliza:

$$R_e = \frac{20100 * Q_g * \gamma_g}{d * \mu}$$

Donde:

γ_g : Gravedad específica del gas a condiciones estándar (aire = 1)

d : Diámetro interior de tubería, in (pulgadas)

μ : Viscosidad del gas, cp

Q_g : Flujo de gas, en MMSCF (millones de pies cúbicos estándar)

El factor de fricción y el número de Reynolds también pueden ser calculados de forma efectiva a través del diagrama de Moody, cuyo valor solo puede usarse para asunción hasta obtener el valor definitivo.

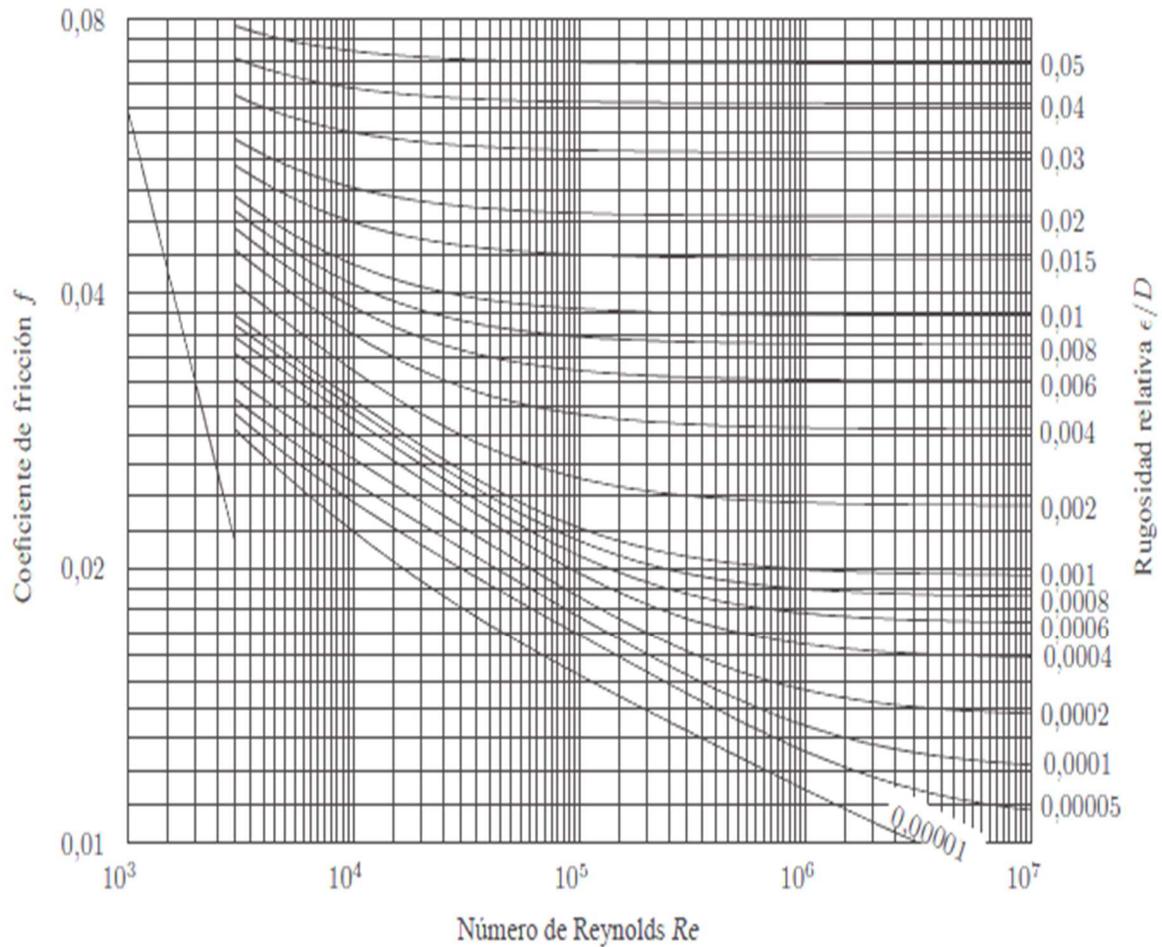


Figura 4 Diagrama de Moody

Fuente: (Domingo, 2011)

Determinadas las ecuaciones para evaluar el factor de fricción en un flujo monofásico, se pueden desarrollar las ecuaciones aplicables a cualquier fluido y en cualquier ángulo de inclinación de la tubería para el gradiente de presión.

$$\frac{dp}{dL} = \frac{g}{g_c} \rho \sin \theta + \frac{f \rho v^2}{2g_c d} + \frac{\rho V DV}{g_c dL}$$

Definir las variables f , ρ y v es lo que mayor dificultad causa al momento de pretender describir el flujo de dos fases. En flujo bifásico, f puede ser una función de otras variables además del número de Reynolds y la rugosidad relativa. (Beggs, 1991).

Asunciones del flujo monofásico a tomar en cuenta, antes de modificar la ecuación del gradiente de presión para un flujo bifásico.

- Para tuberías horizontales el cambio de elevación o componente hidrostático es igual a cero. Para tuberías verticales o inclinadas se aplica para flujo compresible o incompresible que se encuentren en estado estacionario o transitorio.
- Para flujo descendente el seno del ángulo es negativo y la presión hidrostática aumenta en dirección al flujo.
- En el régimen de flujo laminar, las pérdidas por fricción son linealmente proporcionales a la velocidad del fluido. En el flujo turbulento las pérdidas por fricción son proporcionales a la velocidad (v^n), relacionándose el valor de n : $1.7 \leq n < 2$.
- Para un flujo incompresible de área constante, el cambio de energía cinética o componente de aceleración es cero, al contrario;
- Si se produce un cambio de velocidad en un fluido compresible esto ocasionará una caída de presión en dirección del aumento de velocidad.

2.2.1 *Distribución de velocidades y Tensiones cortantes*

Aquí se especifican las ecuaciones para determinar el caudal o gasto que se produce en una tubería cilíndrica de radio R , en condiciones de flujo laminar. A través de una tubería de sección constante en la cual fluye un líquido (homogéneo e incompresible) de viscosidad ν y con presiones de entrada y salida p_1 y p_2 , separadas por una distancia L . (Domingo, 2011).

Si el régimen es asumido como estacionario $v \neq v(t)$ no existe aceleración en la dirección axial y la suma de fuerzas en esta dirección es cero:

$$\sum F = 0 \Rightarrow p_1(\pi r^2) - p_2(\pi r^2) - \tau S_{lat} - mg \sin \theta = 0$$

Como la masa m es ρSL y $L \sin \theta = z$, se tiene:

$$\tau S_{lat} = (p_1 - p_2)S - \rho g z$$

La diferencia de presiones puede ser expresada en función de las pérdidas de carga Δh_{12} , teniendo en cuenta que $v_1 = v_2$ cuando $S_1 = S_2$ y que $z = z_2$, entonces:

$$p_1 - p_2 = \rho g \Delta h_{12} + \rho g z$$

Como la sección de la tubería es constante, a pérdida de carga Δh_{12} es igual a la variación de altura piezométrica entre los puntos $\Delta h_{12}^{piezo} = \Delta h_{12}$, por lo que también podemos escribir:

$$p_1 - p_2 = \rho g \Delta h_{12}^{piezo} + \rho g z$$

Sustituyendo en la ecuación anterior, se eliminan los términos z y se obtiene la distribución de tensiones cortantes:

$$\tau = \frac{\rho g \Delta h_{12}^{piezo} r}{2L}$$

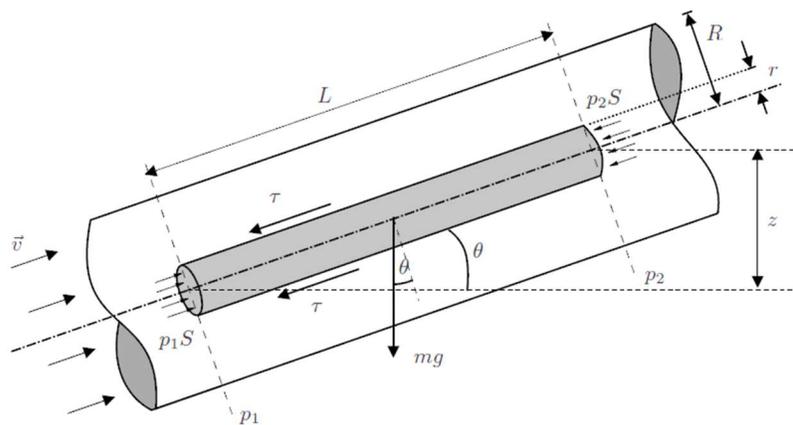


Figura 5 Tubería cilíndrica por donde circula un fluido newtoniano
Fuente: (Domingo, 2011)

Si el régimen de flujo no fuese laminar, existirían dos componentes para la tensión cortante, la deducida anteriormente y una segunda producida por la mezcla de fluido. Aplicando la ley de Newton para este flujo:

$$\tau = -\mu \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\rho g \Delta h_{12}^{piezo} r}{2L} \Rightarrow - \int_{v_{max}}^v dv = \int_0^r \frac{\rho g \Delta h_{12}^{piezo} r dr}{2\mu L}$$

Donde v_{max} es la velocidad máxima sobre el eje, dando:

$$v_{max} - v = \frac{\rho g r^2}{4\mu L} \Delta h_{12}^{piezo}$$

Si tenemos en cuenta que para $r = R$ (es decir sobre la pared de la tubería) debe cumplirse que $v = 0$, tenemos:

$$v_{max} = \frac{\rho g R^2}{4\mu L} \Delta h_{12}^{piezo}$$

Quedando la ley de distribución de velocidades para un fluido newtoniano en régimen estacionario y laminar en la forma parabólica:

$$v(r) = \frac{\rho g \Delta h_{12}^{piezo}}{4\mu L} (R^2 - r^2)$$

Coincidiendo el eje de la parábola con el eje de la tubería.

El caudal a través de una sección elemental dS en la cual la velocidad es constante, $dQ = v dS$, siendo el caudal total la integral de los caudales elementales:

$$\bar{v} S = Q = \int_S v dS = \int_0^R v 2\pi r dr = \frac{\pi R^2}{8\mu L} \rho g \Delta h_{12}^{piezo}$$

Si comparamos con la expresión anterior para la velocidad máxima, se observa que $Q = 1/2 \pi R^2 v_{max}$, y si además se toma en cuenta que la velocidad está relacionada con el caudal a través de $Q = \bar{v} S$, y que la sección es precisamente $S = \pi r^2$, se obtiene de forma inmediata que:

$$\bar{v} = \frac{Q}{S} = \frac{\rho g R^2}{8\mu L} \Delta h_{12}^{piezo} = \frac{1}{2} v_{max}; \quad \text{para una distribución parabólica de velocidades}$$

2.2.2 Flujo Bifásico

En el flujo bifásico el gradiente de presión aumenta para el mismo caudal másico. Los fluidos pueden separarse debido a la diferencia de densidades y fluir a diferentes velocidades en la tubería. (Beggs, 1991).

Para precisar las ecuaciones que caracterizarán al gradiente de presión bifásico, primero es necesario definir y evaluar las variables exclusivas que componen la mezcla gas-líquido.

- a. **Holdup Líquido (H_L).** – Se define como la fracción de tubería que se encuentra ocupada por un líquido en algún instante.

$$H_L = \frac{\text{Volumen de líquido en una tubería}}{\text{Volumen de la tubería}}$$

Es necesario calcular el Holdup Líquido para obtener variables como la densidad de la mezcla, las velocidades reales del gas y del líquido, la viscosidad efectiva y la transferencia de calor. El valor del Holdup Líquido varía de cero para el flujo de gas monofásico, a uno para el flujo de líquido monofásico.

El Holdup de gas se expresa como:

$$H_g = 1 - H_L$$

- b. **Holdup Líquido antideslizante, (λ_L).** - Se define como la relación entre el volumen de líquido en un elemento de tubería, que estaría presente si el gas y el líquido viajaran a la misma velocidad (sin deslizamiento) dividido por el volumen de dicha tubería.

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_g}$$

Donde q_L es la suma de los caudales de agua y petróleo in-situ y q_g es el caudal de gas in-situ. La fracción de vacío o retención de gas no deslizante se define como:

$$\lambda_g = 1 - \lambda_L = \frac{q_g}{q_L + q_g}$$

c. **Densidad.** – El cálculo de la densidad cambia a medida que cambian la presión y la temperatura.

- Cuando dos líquidos inmiscibles, como aceite y agua, fluyen de forma simultánea, la definición de densidad se complica.
- La densidad de una mezcla gas/líquido, resulta difícil de evaluar debido a la separación gravitacional de las fases y al deslizamiento presente entre las mismas.
- La densidad de una mezcla aceite/agua puede calcularse a partir de las densidades y tasas de flujo del petróleo y el agua suponiendo que no ocurra un deslizamiento entre las fases.

$$\rho_L = \rho_o f_o + \rho_w f_w$$

Donde

$$f_o = \frac{q_o}{q_o + q_w}; \quad f_w = 1 - f_o$$

El cálculo de la densidad de una mezcla gas/líquido requiere el conocimiento de la retención del líquido:

$$\rho_s = \rho_L H_L + \rho_g H_g$$

$$\rho_n = \rho_L \lambda_L + \rho_g \lambda_g$$

$$\rho_k = \frac{\rho_L \lambda_L^2}{H_L} + \frac{\rho_g \lambda_g^2}{H_g}$$

d. **Velocidad.** – Llamada también velocidad superficial de una fase fluida, se define como la velocidad que exhibirá esa fase, al fluir a través del área de la sección transversal total de la tubería. La velocidad superficial del gas se calcula a partir de:

$$V_{sg} = \frac{q_g}{A}$$

El área real a través de la cual fluye el gas se reduce por la presencia del líquido a AH_g . Por lo tanto, la velocidad real del gas se calcula a partir de:

$$V_{sg} = \frac{q_g}{AH_g}$$

Donde A es el área de la tubería.

Las velocidades del líquido superficial y real se calculan de manera similar a partir de:

$$V_{sL} = \frac{q_L}{A}; \quad V_L = \frac{q_L}{AH_L}$$

Dado que H_g y H_L son menores que uno, las velocidades reales son mayores que las velocidades superficiales. La velocidad bifásica o de mezcla se calcula en base al caudal, in-situ:

$$V_m = \frac{q_L + q_g}{A} = V_{sL} + V_{sg}$$

Aplicando las definiciones anteriores mencionadas, las ecuaciones de no deslizamiento y de retención de líquido (Holdup Líquido) real son:

$$\lambda_L = \frac{V_{sL}}{V_m}$$

Y

$$H_L = \frac{V_s - V_m[(V_m - V_s)^2 + 4V_s V_{sL}]^{1/2}}{2V_s}$$

- e. **Viscosidad.** – El concepto de viscosidad de dos fases resulta bastante confuso y es definido de diferentes maneras por varios investigadores. Las siguientes ecuaciones son las más aplicadas para el cálculo de la viscosidad de un flujo de dos fases (gas/líquido):

$$\mu_n = \mu_L \lambda_L + \mu_g \lambda_g$$

$$\mu_g = \mu_L^{1/L} + \mu_g^{1/g}$$

$$\mu_s = \mu_L H_L + \mu_g H_g$$

La viscosidad de una mezcla petróleo/agua, generalmente se calcula utilizando las fracciones de aceite y agua que fluyen en la mezcla como factores de ponderación. La ecuación más utilizada es:

$$\mu_L = \mu_o f_o + \mu_w f_w$$

- f. **Tensión Superficial.** - Las correlaciones para la tensión interfacial entre el agua y el gas natural, y el crudo con el gas natural, son funciones que depende de la temperatura y la presión. También dependen de otras propiedades del fluido como la gravedad del petróleo, la gravedad del gas y el gas disuelto.

$$\sigma_L = \sigma_o f_o + \sigma_w f_w$$

Donde:

σ_o : Tensión superficial del petróleo, y

σ_w : Tensión superficial del agua

2.2.3 *Flujo Multifásico*

El flujo multifásico, se define como el flujo en varias fases (líquidas y gases) a través de una misma región espacial de una tubería, en algunos casos con presencia de sólidos, coexistiendo como una mezcla homogénea, el líquido puede presentarse en forma de baches o tapones con empuje de burbujas de gas detrás de él, fluyendo a diferentes configuraciones; según el patrón de flujo que se presente. (Flujo Multifásico).

2.3. **Patrones de flujo en tuberías**

La principal característica del flujo multifásico, es la forma o la configuración en que las fases pueden fluir a través de una tubería de sección transversal circular. Presentando características distintas unas de otras en la distribución espacial que se presenta en la interfase, que deja como resultado la formación de un patrón de flujo distinto para cada configuración.

La forma de determinar este tipo de comportamientos es a través del colgamiento o retención (Holdup) de la fase líquida, y la fracción de vacío. Se deben considerar todo tipo de parámetros tanto físicos como mecánicos, entre ellos están: las fuerzas de flotación, la turbulencia, la inercia

y la tensión superficial, e incluyendo también las pérdidas de presión derivadas por la fuerza de fricción que se produce en cada una de las fases al entrar en contacto con la tubería. (Flujo Multifásico).

Otros aspectos importantes a considerar son las condiciones de operación y distribución geométrica del sistema, gastos de flujo de gas y de líquido, presión de operación, así como la temperatura. En las tuberías son, el diámetro, longitudes, ángulos de inclinación, etc. Y las propiedades fisicoquímicas de los fluidos como densidad, viscosidad, presión de saturación, entre otras. (Ávalos, 2013).

2.3.1 *Patrones de flujo en tuberías verticales*

- **Flujo Burbuja.** – Se conoce como el flujo de burbujas de gas dispersas en un medio líquido. Conforme se reduce la presión del sistema, el gas en solución presente en el crudo se desprende; dando como consecuencia, que el volumen de líquido que viaja por las tuberías, decrezca.
- **Flujo de Bache.** – Al continuar ascendiendo burbujas de gas por la tubería de producción, estas; aumentan de tamaño y se multiplican. Consecuentemente, el efecto de flotación, es directamente proporcional al radio de la misma, alcanzando una etapa en la cual estas burbujas son casi del mismo diámetro de la tubería de producción, de tal manera que el patrón de flujo ha llegado a ser tal, que los baches de aceite que contienen pequeñas burbujas de gas, están separados entre sí por bolsas de gas que ocupan toda la sección transversal de la tubería. Excepto por una película de aceite que se mueve relativamente despacio a lo largo de la pared de la tubería.
- **Flujo Anular.** – A presiones bajas, las bolsas de gas pueden aumentar de tamaño y expandirse a tal grado que logren atravesar los baches del aceite más viscoso, con el resultado de que el gas forme una fase continua cerca del centro de la tubería, llevando hacia arriba gotitas de aceite en ella.
- **Flujo Niebla.** – Al seguir bajando la presión, se tiene como resultado el incremento del volumen del gas, lo que da lugar a una película de aceite alrededor de la tubería, cada vez más delgada hasta que desaparece. Es decir, una fase continua de gas en la cual las gotitas de aceite son transportadas conjuntamente con el gas.

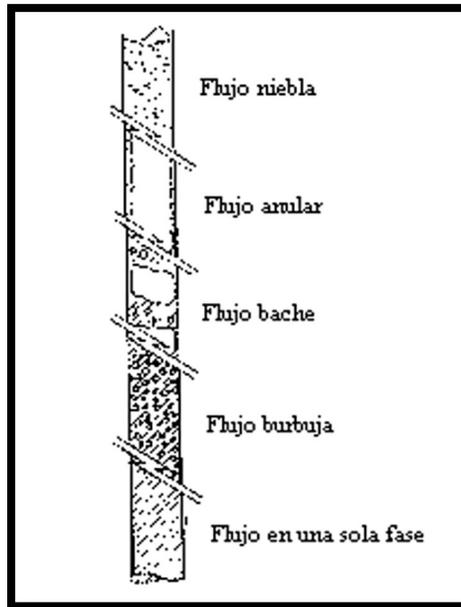


Figura 6 Patrones de Flujo en tubería vertical
Fuente: (Ávalos, 2013)

Los patrones de flujo son más simétricos respecto a la dirección axial y menos influenciados por los efectos gravitacionales.

2.3.2 *Patrones de flujo en tuberías horizontales*

La predicción de las caídas de presión en tuberías horizontales para flujo multifásico es de vital importancia para la industria petrolera, por lo tanto, la comprensión de los mecanismos y características de dos o más fases en una sección del sistema de producción, tiene como finalidad optimizar el diseño de la sección en particular y del sistema en general para obtener la máxima producción con las menores pérdidas de presión.

2.3.3 *Principales patrones de flujo en estas tuberías:*

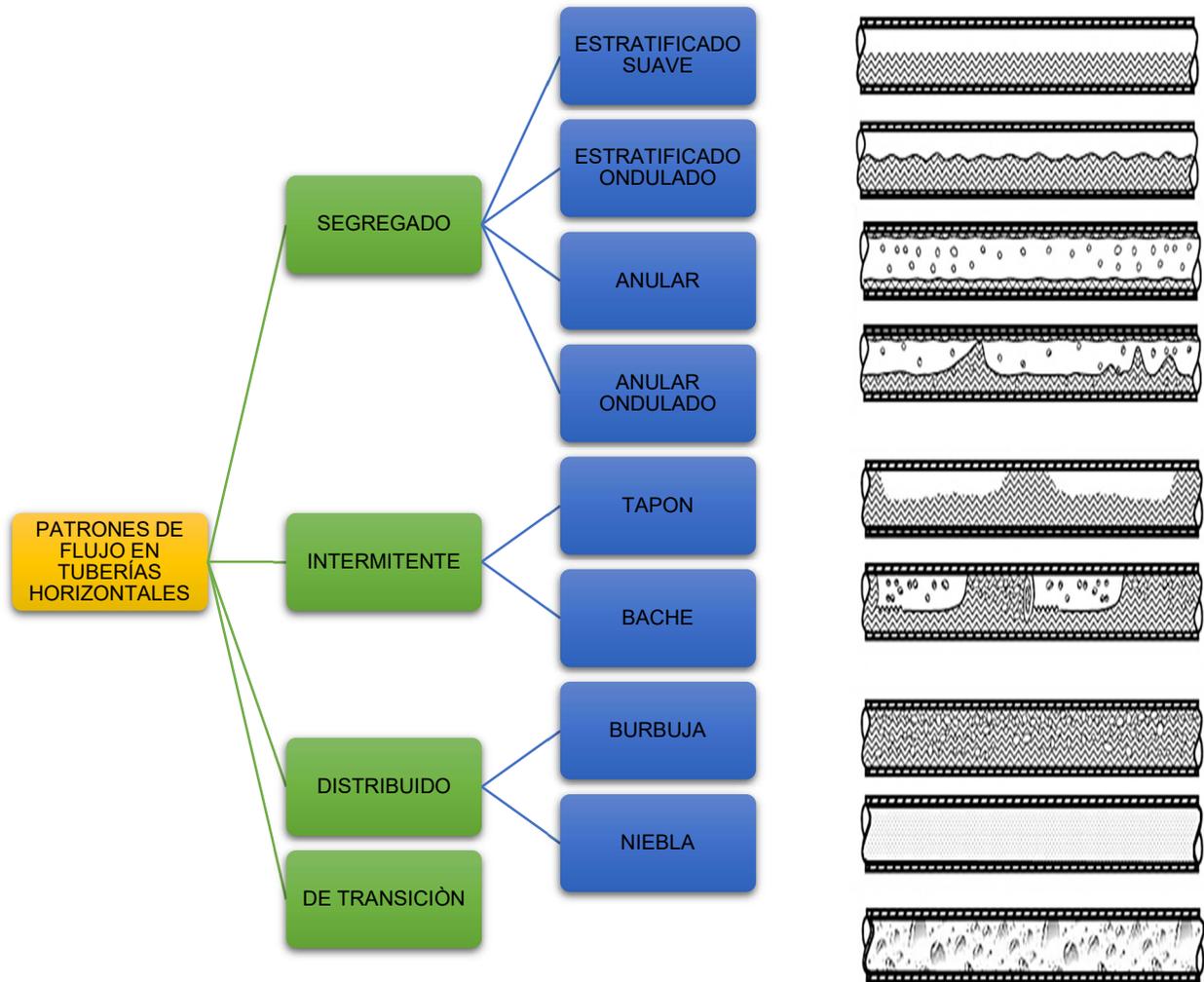


Figura 7 Patrones de flujo en tubería horizontal
Fuente: (Ávalos, 2013)

2.4. Selección de Tuberías

El objetivo de este proyecto trata sobre todo de esclarecer los conceptos que deben ser tomados en cuenta, para tomar una decisión correcta sobre el diseño y la selección de tuberías, debido a que la extracción y el transporte del crudo son procesos que requieren cumplir con medidas de conservación y seguridad. (Tutillo, 2012).

Los parámetros de diseño son:

- **Seguridad.** - Es necesario considerar herramientas básicas para el diseño de tuberías.
- **Economía.** - Costos de capital, costos de operación, costos de mantenimiento, etc.

- **Análisis Hidráulico.** - Se observan los patrones de flujo y las caídas de presión menores.
- **Acciones futuras.** - Futuras exploraciones, cambio en la forma de producción, etc.

2.4.1 *Procedimiento de diseño de tuberías*

- Se toma en cuenta: presión, temperaturas, y otras condiciones, como son: la velocidad del viento, movimientos sísmicos, choques de fluido, gradientes térmicos y el número de ciclos de varias cargas.
- Determinación del diámetro de las tuberías, el cual depende del caudal, la velocidad y la presión del fluido.
- Selección de materiales de la tubería con base a corrosión, fragilidad y resistencia.
- Cálculo del espesor mínimo de pared (Schedule) para las temperaturas y presiones de diseño. **Nota:** se toman los valores establecidos según el material de la tubería.
- Establecimiento de una configuración aceptable de soporte para el sistema de tuberías.
- Análisis de esfuerzo por flexibilidad, necesario para verificar que los esfuerzos se encuentren dentro de los rangos establecidos.

2.4.1.1 *Presión de diseño*

No debe ser menor que la presión producida en las condiciones más severas de presión y temperatura coincidentes, externa o internamente, esperadas en una operación normal.

2.4.1.2 *Temperatura de diseño*

La temperatura de diseño es la temperatura del metal que representa la condición más severa de presión y temperatura coincidentes. Los requisitos para su determinación son:

- Para componentes de tubería con aislamiento externo, la temperatura del metal para diseño será la máxima temperatura de diseño del fluido contenido.
- Para componentes de tubería sin aislamiento externo y sin revestimiento interno, con fluidos a temperaturas $> 32^{\circ}\text{F}$, la temperatura del metal para diseño será la máxima temperatura de diseño del fluido reducida, según los porcentajes de la Tabla 3.
- Para temperaturas $< 32^{\circ}\text{F}$, la temperatura del metal para el diseño, será la temperatura del diseño del fluido contenido.

- Para temperaturas aisladas internamente la temperatura será especificada o será calculada usando la temperatura ambiental máxima sin viento (velocidad cero).

Tabla 3 Reducción de temperatura para componentes sin aislamiento

Componentes	$\sigma T\%$
Válvulas, tubería, uniones solapadas y accesorios soldados	5
Accesorios bridados	10
Bridas (en línea)	10
Bridas de uniones solapadas	15
Empacaduras (en uniones en línea)	10
Pernos (en uniones en línea)	20
Empacaduras (en casquetes de válvulas)	15

2.4.1.3 *Espesor de pared*

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

- El esfuerzo permisible para el material del tubo
- Presión de diseño
- Diámetro de diseño del tubo
- Diámetro de la corrosión y/o erosión

El espesor de pared de un tubo sometido a presión externa, estará dado en función de la longitud el tubo, pues esta influye en la resistencia al colapso del tubo.

2.4.1.4 *Hidráulica de tuberías*

Los problemas de producción del crudo inician al introducirse una segunda fase dentro de la corriente de flujo de una sola fase (mezcla de gas y líquido), esto complica la predicción de los gradientes de presión. De aquí, que la selección y diseño del diámetro de tuberías sea imposible, sin que antes se determinen las caídas de presión.

El criterio para la selección del diámetro de la tubería es analizar cual presenta menores caídas de presión, las cuales estarán relacionadas directamente con la densidad de la mezcla y el efecto que sobre esta tiene el resbalamiento (Holdup) de la fase gaseosa.

Aplicaciones más importantes del cálculo de las caídas de presión en la tubería:

- Minimizar las pérdidas de energía en el flujo de fluidos del cabezal del pozo al separador.
- Determinar el diámetro apropiado de la tubería de producción en base a las menores caídas de presión en presión y regímenes de flujo.
- Obtener el diseño apropiado de las instalaciones del sistema artificial de producción.
- Determinar el diámetro y la longitud adecuados de la tubería horizontal que transporta los fluidos de la cabeza del pozo a la batería de separación.

Para la industria del petróleo es muy importante determinar las características del flujo multifásico en tuberías, puesto que podrían sucederse accidentes u otros problemas que dificulten el transcurso de la operación.

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La principal condición para el diseño de tuberías, es que los sistemas deben ser capaces de transportar determinados gastos de aceite, gas y agua, para que los flujos lleguen al esperado centro de proceso y almacenamiento, cumpliendo las condiciones necesarias de presión y temperatura. Por ello, es necesario analizar:

- La caída de presión en la tubería.
- El diámetro requerido para manejar cierto gasto.
- El gasto esperado de acuerdo al diámetro de la tubería.
- La capacidad de la tubería.

3.1 Tipo de investigación y descripción del modelo

La investigación llevada a cabo es de tipo cuantitativo y cualitativo, solicitando el establecimiento de las propiedades de los fluidos que son requeridos por el simulador, para evaluar las condiciones de flujo en las tuberías, para las cuales se asumirán diferentes diámetros con la intención de determinar las pérdidas mínimas. Posterior a ello; podremos inferir en un diámetro óptimo de tubería, aplicable. Se hace uso de la herramienta ANSYS para el análisis de las variables expuestas.

3.2 Diseño del modelo conceptual

Analizar el diseño de los productos, simulando la mayor exactitud de la hidrodinámica interna y externa de los sistemas de tuberías. Mediante la discretización del flujo numérico de la plataforma ANSYS Fluent, para reconocer el comportamiento del fluido; y predecir las variantes para la construcción del sistema. El programa de ANSYS también admite importar geometrías desde fuentes externas, lo cual deriva en una forma más versátil para el diseño estructural del modelo. (Petroche).

3.2.1 Dinámica de fluidos computacional

La fidelidad y la precisión son dos puntos fundamentales para la simulación CFD (Computational Fluid Dynamics). La Dinámica de Fluidos Computacional se originó con la combinación de dos

disciplinas que son: la mecánica de fluidos y el cálculo numérico. Valiéndose de las ecuaciones que rigen el flujo de fluidos, la transferencia de calor y el estudio de fenómenos relacionados; resueltas en ANSYS a través de distintos modelos numéricos, también llamados “métodos de discretización”.

3.2.2 *Aplicaciones del CFD en la Ingeniería*

La Mecánica de Fluidos Computacional puede ser utilizada desde la fase conceptual de un proyecto; ayudando a determinar la viabilidad y la mejor solución para el producto, hasta la etapa de producción, esto permite al usuario representar diversos escenarios.

El análisis que realiza la herramienta CFD contribuye a:

- Estudios conceptuales para nuevos diseños
- Desarrollo detallado de productos
- La solución de problemas específicos, o
- Rediseño

3.2.3 *Funcionamiento*

El análisis se inicia con la construcción del mallado y la posterior definición de las condiciones del objeto a observar. Modelando las propiedades del fluido y del entorno, que integran las condiciones de conservación de la masa, de momento y de energía.

3.2.4 *Mallado*

Luego de definir el objeto a estudiar, se procede a montar un conjunto finito de volúmenes de control conocido como malla o grid, que estará regido por una serie de ecuaciones diferenciales algebraicas, de las que se destacan la conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía, entre otros.

Existen diferentes tipos de mallado, cuya selección va a depender de la estructura que se planea representar y la precisión que requiera. Los tipos que se destacan son:

- Las **Mallas Hexagonales** son utilizadas para geometrías simples, pero que proporcionan soluciones de alta calidad con menor cantidad de células.

- Para geometrías complejas, las mallas hexagonales no presentan ventajas numéricas y se pueden ahorrar esfuerzos usando **Mallas Triangulares**.
- Se utiliza una **Malla Híbrida** cuando se requiere aumentar la eficiencia y exactitud del modelo.

3.2.5 Discretización

Los **métodos de discretización** más difundidos son: el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos o de control. Con ellos, se intercambia el dominio continuo por un dominio discreto, para generar un sistema de ecuaciones que debe ser resuelto numéricamente de forma simultánea, asignando un campo de flujo para cada grupo de celdas.

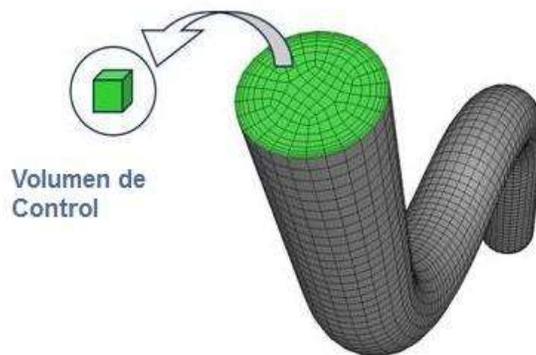


Figura 8 Región tubular de flujo de un fluido discreto

Fuente: (Petroche)

En el desarrollo de un producto, el diseño de un prototipo o producto es importante, debido a que se puede virtualmente considerar una evolución constructiva, conforme otras fases se desarrollan a la par, y alcanzar un producto final objetivo, funcional, y confiable.

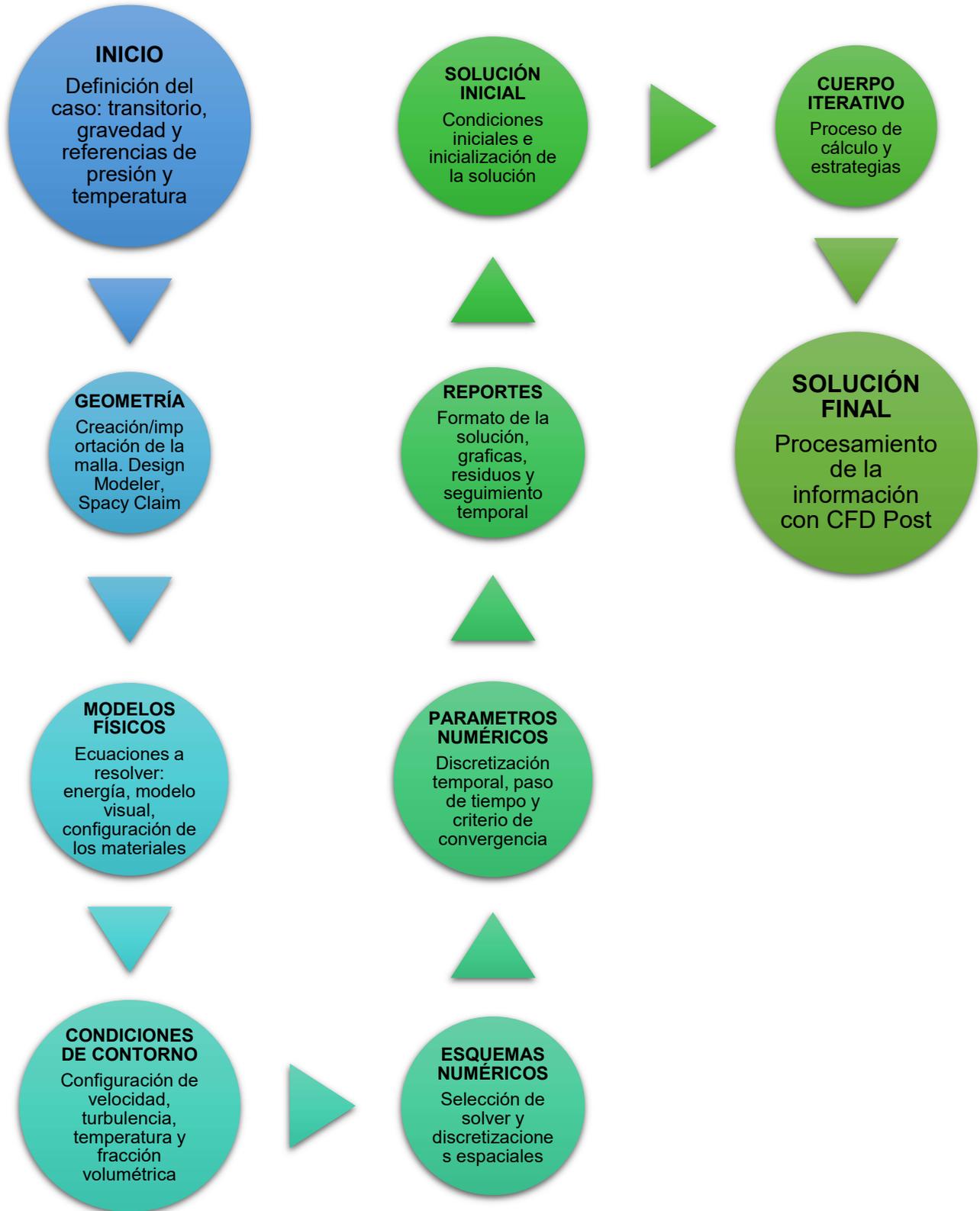


Figura 9 Esquema de implementación para la simulación en ANSYS Fluent

Fuente: (Vinuesa, 2017)

3.3 Modelos matemáticos disponibles en ANSYS Fluent, para la simulación de flujo multifásico

3.3.1 Modelo VOF (Volume of Fluid)

Este modelo admite la configuración de dos o más fluidos inmiscibles al resolver las ecuaciones de conservación de masa para las fracciones volumétricas de cada fase secundaria. (Vinuesa, 2017). Para la fase 1, tendríamos:

$$\frac{1}{\rho_1} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_1 \rho_1) + \nabla * (\alpha_1 \rho_1 \vec{v}_1) = S_{\alpha_1} + \sum_1^n (\dot{m}_{1,2} - \dot{m}_{2,1}) \right]$$

Donde:

α_1 : fracción volumétrica de la fase 1.

ρ_1 : densidad del fluido de la fase 1.

\vec{v}_1 : velocidad de la fase 1.

$\dot{m}_{1,2}$: flujo másico desde la fase 1 hasta la fase 2.

S_{α_1} : término fuente de fracción volumétrica.

El cálculo de la ecuación anterior está basado en la restricción que impone la definición de fracción volumétrica:

$$\sum_1^n \alpha_1 = 1$$

Posteriormente, se resuelve la ecuación de conservación de momento para toda la mezcla:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla * (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla_1 + \nabla * [\mu(\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

Donde la primera parte de la ecuación, expresa la variación temporal de la cantidad de movimiento, y el término convectivo. La segunda parte de la ecuación muestra las variaciones de cantidad de movimiento originadas por el gradiente de presión y el término viscoso (fuerzas superficiales), las fuerzas volumétricas de gravedad y otras fuerzas que dependen de los submodelos empleados, como sustentación y arrastre.

El cálculo de las propiedades se realiza mediante el cálculo de la propiedad efectiva que pondera la propiedad de cada fase con su fracción volumétrica, obtenida de la siguiente ponderación:

$$\rho = \sum \alpha_1 \rho_1$$

La ecuación de la energía, también se calcula para toda la mezcla de forma similar a la ecuación de momento, siendo compartida por todas las fases, utilizando valores ponderados para la densidad, y valores promediados con la masa y la fracción volumétrica para la energía y temperatura:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla * (\vec{v}(\rho E + 1)) = \nabla * (K_{eff} \nabla T) + S_h$$

Donde:

E : energía interna promediada de la masa en la mezcla.

v : velocidad de la mezcla.

ρ : densidad ponderada de la mezcla.

K_{eff} : es la constante de intercambio de calor efectiva

S_h : es el término fuente de energía.

$$E = \frac{\sum_1^n \alpha_1 \rho_1 E_1}{\sum_1^n \alpha_1 \rho_1}$$

3.3.2 *Modelo Mixture*

Modelo multifase simplificado que puede ser utilizado en problemas muy variados, desde flujos multifase en los que las fases se mueven a diferentes velocidades, pero asumiendo equilibrio local en la escala espacial corta, hasta flujos homogéneos con fuerte acoplamiento de las fases entre sí, moviéndose a igual velocidad.

La modelación en n fases se realiza mediante la resolución de la ecuación de conservación completas para la mezcla total, las ecuaciones de fracción volumétrica para cada fase individualmente y ecuaciones algebraicas para las velocidades relativas.

Limitaciones

- Solo puede emplearse en un esquema de solver basado en el campo de presiones.

- Solo puede definirse una única fase como gas ideal compresible.
- Incompatible con los modelos de fusión y solidificación.
- No es válido para flujos inmiscibles.

3.3.3 *Modelo Eulerian*

Este modelo es el más completo y cubre un amplio abanico de flujos multifase en su aplicación, ya que resuelve para cada fase que participa en flujo las ecuaciones de conservación, para después acoplarlas entre si ya que todas comparten el mismo campo de presiones. Las características de este modelo son:

- Un único campo de presiones compartido por todas las fases.
- Ecuaciones de continuidad y momento resueltas independientemente para cada fase.
- Varias funciones disponibles para el cálculo del coeficiente de arrastre, sustentación y turbulencia, para modelizar gran variedad de regímenes multifase.
- Modelos de viscosidad $k - \varepsilon$ y $k - \omega$ disponibles y aplicables de forma independiente a cada una de las fases.

Limitaciones:

Con este modelo, el número de fases secundarias solo está limitado por los recursos de memoria del computador, y en problemas muy complejos, por el comportamiento de convergencia.

- El cálculo de turbulencia por el método de Reynolds Stress no está disponible en el cálculo de la turbulencia para cada fase.
- Fluidos inmiscibles.
- Fusión y solidificación.
- Seguimiento de trayectoria en flujos particulares.

3.4 Recopilación de datos

Se ingresan las propiedades del fluido y de la tubería, para la resolución del análisis. (Saldarriaga, 1998). Se asumen diferentes diámetros, para observar la conducta del flujo y contemplar una opción optima de diseño.

Tabla 4 Datos de entrada de la tubería

TUBERÍA	
Longitud	1000 mm
Altura	500 mm
Diámetro	variable
Rugosidad	0.0018 in
Espesor	0.154 in
Angulo de inclinación (θ)	90°
Presión	0 atm (101325 Pa.)
Temperatura	0 °C
Dirección del flujo	Cuesta arriba

Tabla 5 Propiedades del fluido

LÍQUIDO		GAS	
Densidad	900 kg/m ³	Densidad	141.3 Kg/m ³
Viscosidad	50 cp.	Viscosidad	0.02 cp.
Temperatura	25°C	Tasa de flujo volumétrico (Qg)	9 m ³ /h
Tensión superficial	28 dina/cm		
Tasa de flujo volumétrico (Ql)	14.15 m ³ /h	Presión de entrada	1725.95 PSIA

Es necesario analizar la caída de presión y las pérdidas de carga que se producen para diferentes tamaños de tubería; desde su entrada, hasta la salida en unidades de presión.

Tabla 6 Coeficientes de pérdidas menores

ACCESORIOS	k_m	
Válvula de globo, completamente abierta	10	
Válvula en ángulo, completamente abierta	5	
Válvula de cheque, completamente abierta	2.5	
Válvula de compuerta, completamente abierta	0.2	
Válvula de compuerta, con $\frac{3}{4}$ de apertura	1 - 1.15	
Válvula de compuerta, con $\frac{1}{2}$ de apertura	5.6	
Válvula de compuerta, con $\frac{1}{4}$ de apertura	24	
	Roscado ($r/d = \pm 1$)	0.55
	Roscado de radio largo	0.29
Codo de 90°	($r/d = \pm 1.5$)	
	Bridado, soldado, doblado ($r/d = \pm 1$)	0.36
	Estándar ($r/d = \pm 1$)	0.29
Codo de 45°	Radio largo, ($r/d = \pm 1.5$)	0.21
Retorno (curva en U)		2.2
Tee en sentido recto		0.3
Tee a través de la salida lateral		1.8
Unión		0.3
Ye de 45°, en sentido recto		0.3
Ye de 45°, salida lateral		0.8
Entrada recta a tope (borde al ras)		0.5
Entrada con boca redondeada		0.24
Entrada con proyección hacia adentro		0.78
Entrada con boca biselada		0.25
Salida		1

3.5 Construcción del modelo

3.5.1 Selección del modelo multifase

Es recomendable aplicar el modelo VOF, por las facilidades que ofrece ante la simulación de flujos inmiscibles, tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Se puede considerar la coexistencia de dos fases, separadas por una frontera bien definida físicamente; que se interpretan en la formación de los patrones de flujo.
- No se contemplan transferencias de masa, lo que reduce el tiempo de iteración.

3.5.2 Etapa de simulación

La simulación en ANSYS Fluent está precedida de varias etapas (antes mencionadas) que harán que el sistema converja y permita mostrar los resultados del análisis de las diferentes fases que fluyen por la tubería.



Procedimiento

- a) **Geometría.** - Se construyen modelos sencillos de tramos de tubería en el programa AutoCAD que luego ser exportadas a ANSYS, bajo las especificaciones de diseño de la ASTM A53, para tuberías de acero al carbón (espesor de pared: 0,154 in).

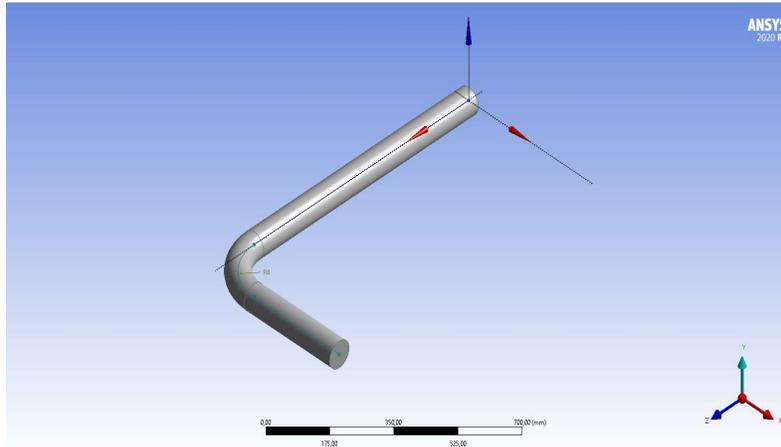


Figura 10 Geometría de una sección de tubería
Fuente: Elaboración propia. ANSYS Fluent.

- b) **Mallado.** – Se realiza el mallado de la geometría, se definen las áreas de trabajo y las zonas de condiciones de frontera para el cuerpo.

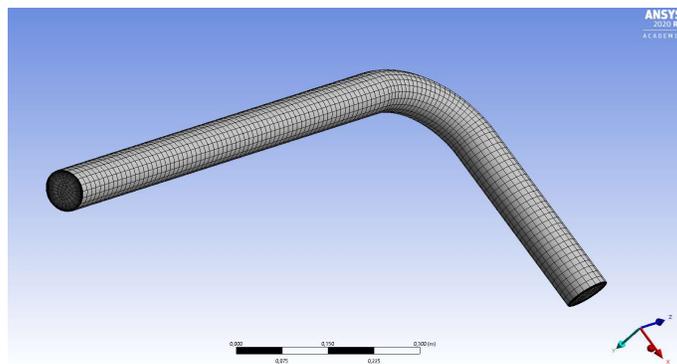


Figura 11 Mallado Hexagonal
Fuente: Elaboración propia. ANSYS Fluent.

- c) **Set-up.** – Se establece el tipo de estudio, las condiciones de frontera, los materiales, las ecuaciones a considerar, solver matemático, etc.

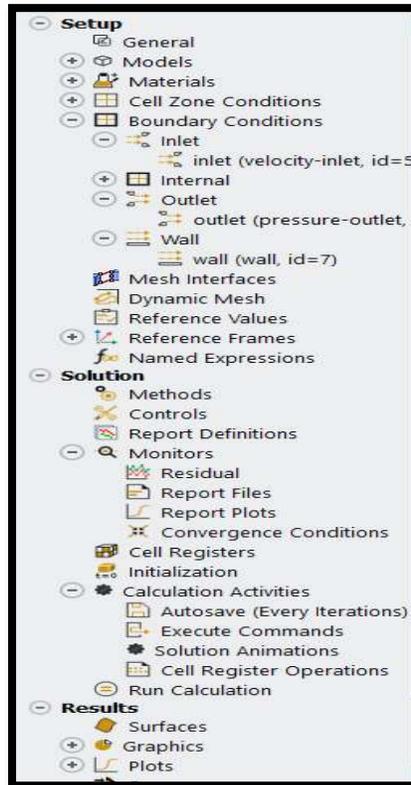


Figura 12 Setup del simulador
Fuente: ANSYS Fluent.

d) Solución. - Se resuelven las iteraciones indicadas anteriormente, esperando que todas las variables converjan de forma correcta.

3.6 Verificación y validación

Culminada la etapa de diseño del producto, es necesario verificar que este cumpla con las características planteadas de reducir la incertidumbre de la puesta en marcha de las operaciones, realizando para ello; mediciones de comportamiento a través de un sistema iterativo.

Las ventajas que tiene el diseño de detalle son:

- Es posible verificar mediante software el desempeño del modelo, gracias a los diversos sistemas matemáticos de simulación, de manera visual o en 3D.
- Las reparaciones son sencillas y rápidas, con menor coste, los fallos se pueden diagnosticar y remediar.

- El producto final es fiable si se define adecuadamente su funcionalidad en las bases de diseño, esto es, de acuerdo con sus especificaciones, durante un cierto período de tiempo y bajo condiciones operativas específicas.

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Modelar directamente una red de tuberías completa resulta un tanto problemático para la convergencia de la simulación. Esto debido a que las condiciones iniciales podrían no ser claras, y los fenómenos físicos que resultasen podrían no tener relación con un caso real. Como consecuencia, será necesario generar una estrategia adecuada de simulación, a través de las siguientes técnicas:

- El estudio puede aplicarse en secciones de la red de tubería (en base a la variación de diámetro); en donde se analicen los patrones de flujo creados por la separación de la diferencia de fases.
- La inclusión progresiva de variables permitirá al sistema converger de forma confiable. Se analiza el problema en primer orden, para lograr un análisis rápido del estudio.

A continuación, se detalla la estrategia de simulación multifase aplicada en este proyecto.

4.1 Implementación del modelo VOF

a. Modelo viscoso

Para la definición entre flujo laminar o turbulento, seleccionamos el método $k - \epsilon$, en estado “Realizable”.

b. Modelo multifase

(Àvalos, 2013). Activamos el modelo multifase y seleccionamos el método “Volume of Fluid” que se había recomendado previamente. El número de fases a simular serán dos, y se aplicara el método “Level Set” para que el programa tenga paso a rastrear las fronteras que se forman entre las fases y realizar el cálculo preciso de la curvatura y las fuerzas de tensión superficial. Consideramos un esquema de resolución explícito para la fracción volumétrica, que asegure la convergencia del método; y como el sistema se encuentra planteado a condiciones de superficie, seleccionamos la opción de “Open Channel Flow”.

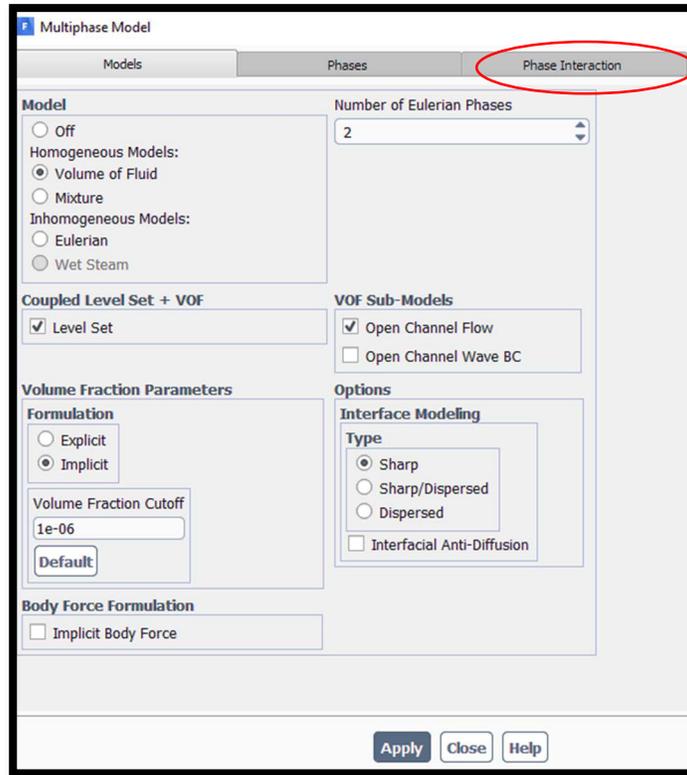


Figura 13 Configuración del modelo multifásico
Fuente: ANSYS Fluent.

Interacción entre fases. – Se configura el valor de la tensión superficial ($28 \cdot 10^{-6}$ N/m), y la transferencia de masa. Al inicio de la operación este valor puede despreciarse, e incluirse posteriormente para la validación del método.

c. Condiciones de contorno

Las condiciones establecidas son las siguientes:

- **Inlet:** entrada del fluido a la tubería (velocity Inlet).
- **Outlet:** salida del fluido a condiciones de presión (Pressure Outlet).
- **Wall:** contacto entre la pared de la tubería y el fluido.

d. Condiciones iniciales

Implementamos un perfil de temperaturas para la segunda fase, el gradiente de presión para toda la tubería es de $0 \text{ }^\circ\text{C}$. en consecuencia se configura una temperatura uniforme de 25°C , para que el programa logre captar el comienzo del fenómeno de ebullición que se produce en superficie.

e. Algoritmo de solución y discretización

La guía de Fluent recomienda el solver acoplado PISO, para la solución numérica. La discretización disponible para la variable de presión está dada por “PRESTO” y para la fracción volumétrica en “Geo-Reconstruct”. el resto de variables pueden ser tomadas en primer orden para el inicio de la solución, a excepción de la conservación de momento que esta dada en segundo orden por default por parte de Fluent.

f. Criterio de convergencia

Se utilizan los valores establecidos por ANSYS Fluent (0.001). Este valor puede cambiarse luego, por consideraciones propias.

4.2 Análisis y Discusión de las variables

Es posible observar que el fluido pierde energía durante su transporte en conducciones cilíndricas rectas. Debido a las fuerzas de rozamiento y de fricción presentes por el contacto con la tubería.

Como resultado, las velocidades de cálculo con las iteraciones de primer orden fueron bastante buenas. Alcanzando la convergencia de cálculo esperado con los parámetros trazados.

Se analiza la circulación de fluidos con diferentes diámetros de tubería, concluyendo que la modelación cumple con ciertos aspectos esperados de conducta:

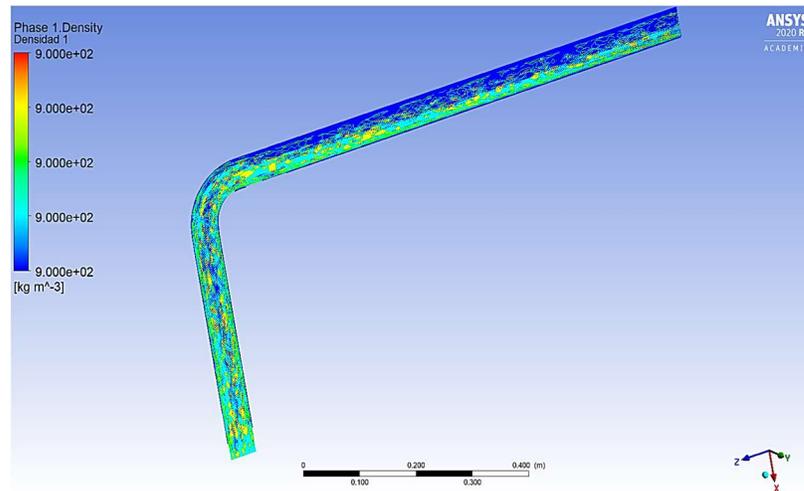
- Durante el transporte del fluido por las tuberías, la diferencia de densidades produce una separación de las fases, por lo que cada una de ellas circula a una velocidad diferente, formando distintos patrones de flujo.
- Para observar un cambio en los patrones de flujo es necesario realizar variaciones de diámetro, que cambian también las velocidades superficiales, el número de Reynolds y el factor de fricción.
- El análisis de flujo es realizado mediante técnicas empíricas, y las variaciones de diámetro efectivamente permiten contemplar opciones para la optimización.
- La simulación en ANSYS permite visualizar como se producen las caídas de presión en el fluido, con el fin de interpretar su comportamiento, para seleccionar el diámetro de diseño que optimice el proceso de transporte.

Tabla 7 Análisis de ANSYS Fluent

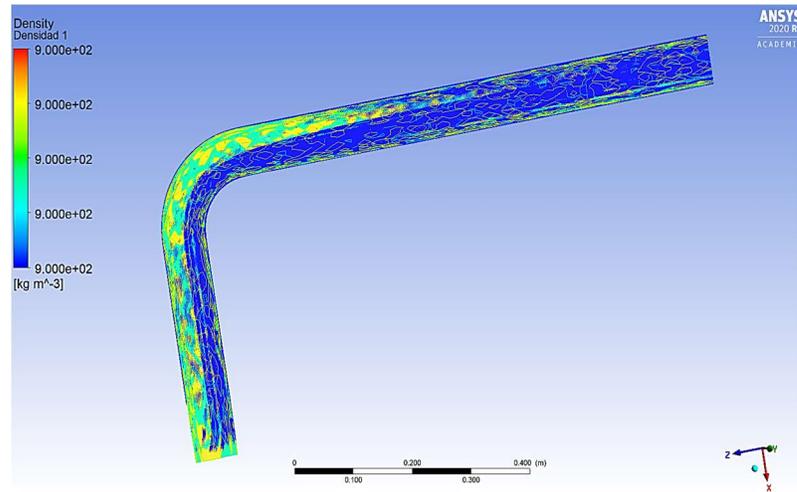
RESULTADOS OBTENIDOS CON LA SIMULACIÓN DE ANSYS		
Diámetros (in)	Patrón de flujo	Caída de presión (atm)
2	Intermitente	0.1028
3	Intermitente	0.2043
4	Intermitente	0.0056

4.2.1 *Identificación de los patrones de flujo, de acuerdo a la distribución de densidades.*

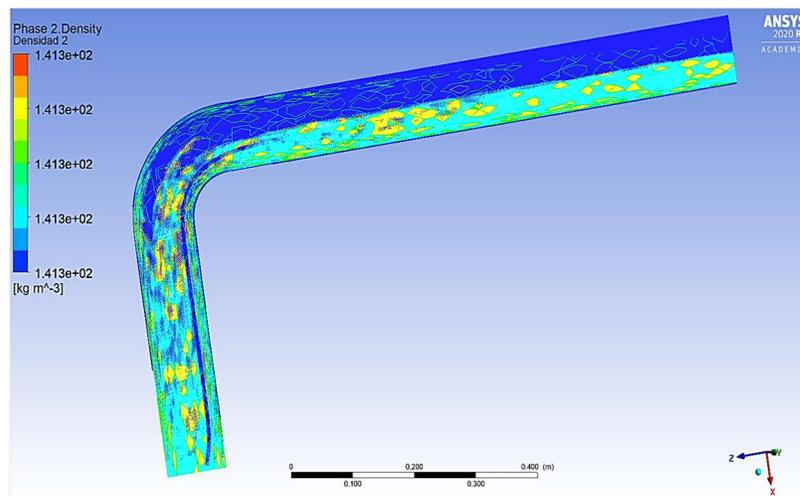
El flujo puede definirse como intermitente, por la presencia alternativa que se produce del gas y del líquido en la tubería, en donde bolsas de gas están contenidas con líquido en forma de capas estratificadas, que fluyen a lo largo de la parte inferior de la tubería. Figura 13: (azul: líquido, celeste: gas).



(a)



(b)



(c)

Figura 14 Patrones de flujo, según la densidad gas/líquido
Fuente: Elaboración propia. ANSYS Fluent.

4.2.2 *Distribución de la velocidad*

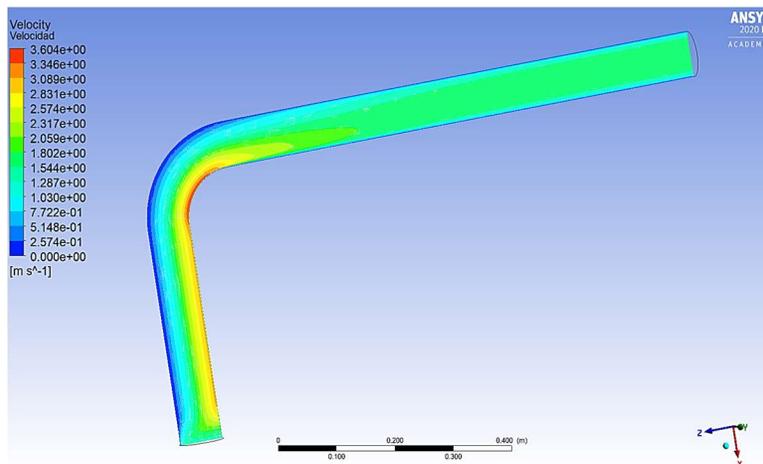
Los resultados mostrados en la figura 13, indican cómo se distribuye la velocidad a lo largo de la sección de tubería; al ser evaluada en diferentes diámetros. Es posible observar que la zona de máxima velocidad se forma en la pared interior del codo y que la zona de menor velocidad se encuentra en la pared exterior del mismo, con una clara separación formada por una capa límite.

Podemos notar también, que la distribución de velocidad que se forma en la figura (a) es mayor en varios puntos de la tubería. Esto es debido a que, en las tuberías de menor diámetro el fluido tiende a viajar con mayor velocidad.

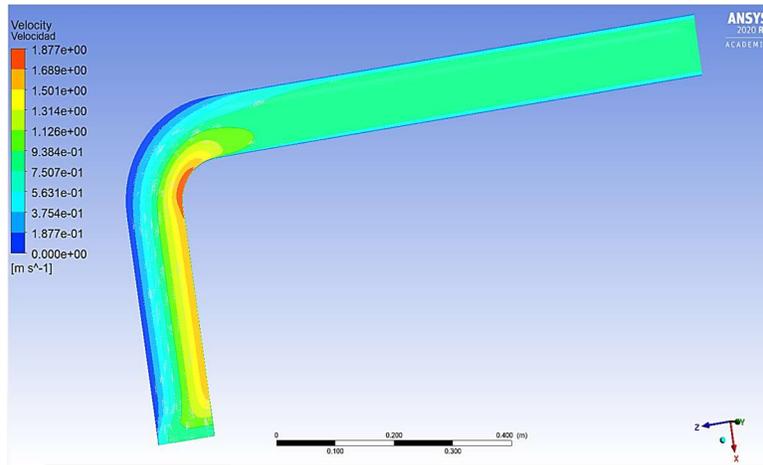
La alta velocidad que se crea en el interior del codo ocurre debido al cambio de dirección que se presenta durante el transporte. Este cambio se relaciona con el aumento de turbulencia que atraviesa el fluido, junto a las fuerzas centrífugas que lo componen.



(a)



(b)



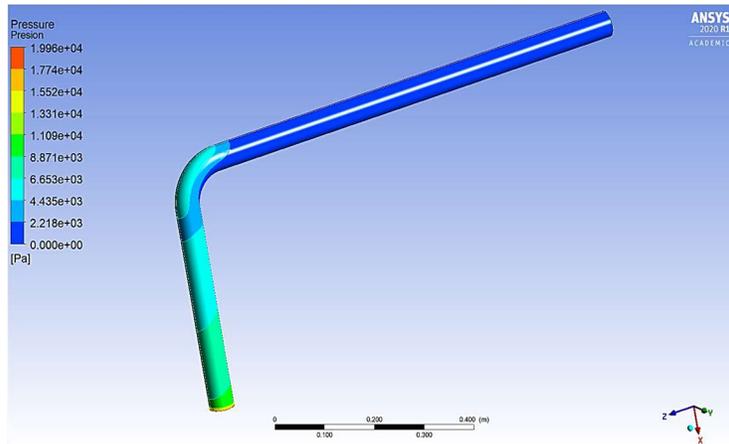
(c)

Figura 15 Distribución de velocidad. **(a)** D: 2in, **(b)** D: 3in, **(c)** D: 4in
Fuente: Elaboración propia. ANSYS Fluent.

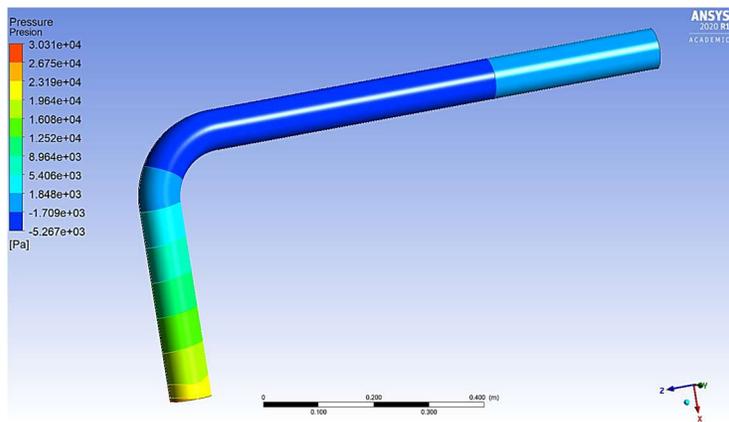
4.2.3 *Distribución de presión*

Como ya se había mencionado anteriormente, es normal observar que el fluido pierda presión debido a las variaciones de altura con las que se crea el diseño. La figura 14, en efecto muestra como la presión estática disminuye gradualmente a lo largo de la dirección del flujo, debido a los efectos de elevación y de fricción que se crean por el contacto del fluido con la tubería.

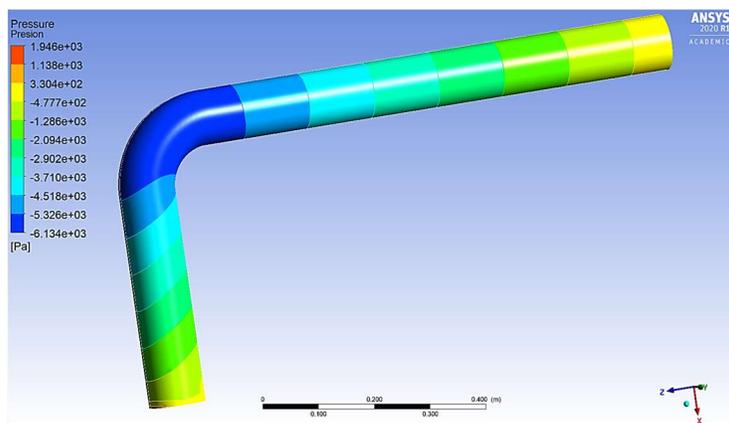
Si nos fijamos en las variaciones de presión que atraviesa el fluido al ser evaluado en diferentes diámetros, es posible notar como esta se reestablece en función del aumento de diámetro. Indicándonos que la implementación de un diámetro mayor podría resultar en una opción de diseño óptima para las operaciones del transporte de fluidos.



(a)



(b)



(c)

Figura 16 Distribución de presión en la tubería. **(a)** D: 2in, **(b)** D: 3in, **(c)** D: 4in
Fuente: Elaboración propia. ANSYS Fluent.

4.3 Análisis Económico

El análisis económico, tomado del documento de (García, 1998), nos permitirá comprobar que las opciones de diseño planteadas puedan satisfacer la idea de aplicación, bajo fundamentos de costos que habilitan la toma de decisiones.

Para el análisis se toma en cuenta los requerimientos de bombeo, que determinan las velocidades del fluido, llevado a cabo mediante las ecuaciones del balance de energía mecánica. En este caso, las pérdidas de carga se registrarán a los efectos de la selección del diámetro de la línea, limitándonos a resolver la optimización teórica – económica entre los costos fijos y los gastos de operación.

Tabla 8 Datos de entrada para llevar a cabo análisis económico

TUBERÍA		FLUIDO MULTIFÁSICO			
Longitud	1000 mm	Tasa de flujo	23.15 m ³ /h		
Altura	500 mm	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	D_{N1}	D_{N2}	D_{N3}
			651.52	637.95	656.14
Diámetro	variable	Viscosidad de la mezcla	33.6315		

Se conoce la siguiente información:

- a) Modelo reológico a la Temperatura de trabajo

$$\tau_w = 0.75 * \gamma^{0.7}$$

- Horas de funcionamiento anual: 2500 h, 18 h/d
- Vida útil de la instalación, 12 años
- Valor medio de la energía eléctrica durante la vida útil: 0.09 \$/kW – h

- b) El costo de la tubería está dado por:

$$\frac{C_T}{L} = 0.7 * D_N^{1.5}$$

Donde:

D_N : Diámetro nominal

Eficiencia de la bomba: 0.7

De acuerdo con el balance de energía mecánica:

$$-W = g * H_h + \sum F$$

$$-W = g * H_h + f_g \frac{L * v^2}{2D}$$

Seleccionamos $D_N = 2$ in, de acuerdo con ello tenemos:

- D : 0.0508 m
- A_f : $20.26 * 10^{-4} m^2$
- Q : $6,4 * 10^{-3} m^3/s$

$$v = \frac{Q}{A_f} = 3.17 m/s$$

$$\frac{8 * v}{D} = 499.21 s^{-1}$$

Cálculo de la viscosidad efectiva (μ_e)

$$\tau_w = 0.75 * \gamma^{0.7}$$

$$\tau_w = 0.75 * \left[\left(\frac{3 * n + 1}{4 * n} \right) \left(\frac{8 * v}{D} \right) \right]^{0.7}$$

$$\tau_w = 0.75 * \left[\left(\frac{(3 * 0.7) + 1}{4 * 0.7} \right) \left(\frac{8 * v}{D} \right) \right]^{0.7}$$

$$\tau_w = 0.8 * \left(\frac{8 * v}{D} \right)^{0.7}$$

Entonces:

$$\mu_e = 0.8 * \left(\frac{8 * v}{D} \right)^{-0.3}$$

$$\mu_e = 0.1241 Pa * s$$

$$Re_g = \frac{D * v * \rho}{\mu_e} = \mathbf{841.48}$$

$$f_g = \frac{64}{Re_g} = \mathbf{0.076}$$

Sustituyendo los valores conocidos en la ecuación de balance:

$$-W = 9.81 * 0.5 + \left(\frac{0.082 * 100 * (3.17^2)}{2 * 0.0508} \right) = 751.3$$

$$Pot = \frac{(-W) * w}{\eta}$$

$$Pot = \frac{(-W) * (Q * \rho)}{\eta} = 4475.33 \text{ W}$$

$$\mathbf{Pot = 4.47 kW}$$

Costo de la bomba:

$$C_B = Pot * c * t$$

$$\mathbf{C_B = 1006.95 \$/año}$$

Cálculo del costo fijo

$$C_F = \frac{C_T + C_{man}}{V_{\text{útil}}}$$

Donde:

$$C_{man} = 0.4 * C_T$$

Reemplazamos C_{man} y C_T

$$C_F = \frac{1.4 * 0.7 * L * D_N^{1.5}}{V_{\text{útil}}}$$

$$C_F = \frac{1.4 * 0.7 * 100 * 2^{1.5}}{12} = \mathbf{23.098 \$/año}$$

Costo total:

$$C_T = C_B + C_F$$

$$C_T = 1030.048 \text{ \$/año}$$

Los mismos cálculos se aplican para los diámetros de tubería de 3 y 4 in, obteniéndose los siguientes resultados:

D_N (in)	C_F (\$/año)	C_B(\$/año)	C_T(\$/año)
2	23.098	1006.95	1030.05
3	42.435	291.06	333.50
4	65.333	123.29	188.63

El tamaño óptimo de operación es de 4in. Diámetros mayores resultan más costosos en función de los costos fijos, y las tuberías de menor diámetro requerirían mayores gastos de operación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- El transporte de fluidos en tuberías es un proceso complejo, que requiere del conocimiento previo de todas las variables que pueden intervenir o formarse dentro un sistema. Los avances de la simulación permiten a los usuarios interpretar estas variables bajo diferentes escenarios de operación, y contribuyen a definir ideas sobre la selección y el diseño óptimo de tuberías. Para que sean capaces de soportar las cargas impuestas y convertirse en productos duraderos.
- La presencia de flujo multifásico plantea un gran reto en el diseño de instalaciones; debido a que el comportamiento de las fases no es continuo, por tanto, la simulación llevada a cabo, se realizó con el fin de dilucidar este comportamiento, y percibir los efectos que puede oponer sobre la tubería.
- Los factores que mayor impacto generan sobre las caídas de presión y las pérdidas de carga en un sistema son: la presión en la entrada, la densidad del fluido (que permite denotar las distintas fases que se crean, debido a su inmiscibilidad), el diámetro interno, la longitud y la elevación.
- Incrementar los diámetros de tuberías puede ser una opción tomada en cuenta para la optimización, pero es importante verificar que esto se ajuste también a los beneficios económicos.
- Es importante tomar en cuenta los factores externos del proyecto, como el lugar de la instalación y las legislaciones ambientales. Los trabajos de mantenimiento ayudaran a que el proceso se continúe ejecutando sin problemas.

5.2 Recomendaciones

- Implementar mayores escenarios de simulación, que permitan incluir el análisis de mayores limitantes operativas, para deducir los futuros fallos con mayor precisión.

- El análisis del comportamiento del flujo multifásico es algo realmente importante para las operaciones de transporte, puesto que, su presencia genera inestabilidad en el proceso de compresión y bombeo; además, los patrones de flujo pueden cambiar con el tiempo y crear problemas de corrosión que requerirían cambios de instalación.
- El análisis económico se basa solo en las capacidades de bombeo del sistema, pero es muy importante realizar un análisis de diseño completo, sobre todo; tomando en cuenta que la presencia de flujo multifásico puede afectar las instalaciones, lo que demanda tomar en cuenta varios criterios de producción.
- Realizar revisiones periódicas, para verificar el estado de las líneas de producción en términos de distribución de presión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Academia*. (s.f.). Obtenido de:
https://www.academia.edu/9699165/SISTEMAS_BOMBEO_MECANICO_BMC_Y_NEUM%C3%81TICO_BN
- [2] *Acta Académica*. (s.f.). Obtenido de: <https://www.aacademica.org/javier.pajon.permuy/8>
- [3] Ansys. (s.f.). *Esss*. Obtenido de: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- [4] ANSYS, I. (11 de Octubre de 2019). *Wikipedia*. Obtenido de:
<https://es.wikipedia.org/wiki/ANSYS#Resumen>
- [5] Àvalos, J. C. (2013). “ANÁLISIS, DISEÑO Y MODELADO DE REDES DE RECOLECCIÓN PARA EL MANEJO DE LA PRODUCCIÓN DEL ACTIVO BELLOTA - JUJO”. México.
- [6] Beggs, H. D. (1991). *PRODUCTION OPTIMIZATION USING NODAL ANALYSIS*. Tulsa, Oklahoma: OGCI, Inc, Petroskills, LLC.
- [7] Begoña, M. V. (Marzo de 2011). *UPCommons*. Obtenido de
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/11998>
- [8] Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*. Madrid: Creative Commons.
- [9] Flujo Multifásico, G.-I. (s.f.). *Google Sites*. Obtenido de:
<https://sites.google.com/site/flujomultifasicogasliquido2017/flujo-multifasico-en-tuberias>
- [10] Gálvez, I. J. (2011). CINEMÁTICA DE LOS FLUIDOS. En I. J. Gálvez, *MECÁNICA DE FLUIDOS Y MÁQUINAS HIDRÁULICAS*.
- [11] García, A. A. (1998). *yumpu*. Obtenido de:
<https://www.yumpu.com/es/document/read/14310690/seleccion-del-diametro-optimo-de-tuberias-para-fluidos-no->
- [12] I. Martín, R. S. (2011). *MECÁNICA DE FLUIDOS. Tema1. FLUJO INTERNO DE FLUIDOS INCOMPRESIBLES Y COMPRESIBLES*. California : .
- [13] Julio C. Pérez Angulo, M. E. (2016). MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA NO CONVENCIONAL DE LAVANTAMIENTO MULTIFÁSICO. *El Reventón Energético*, 16 Páginas.

- [14] Montejo, J. L. (2019). *DISEÑO DE UN SISTEMA SIMULADOR FÍSICO DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO SEMEJANTES A LAS REALES*. Villahermosa, Tabasco.
- [15] Petroche, J. E. (s.f.). *SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA BOMBA TURBINA HIDRÁULICA MEDIANTE CFD*.
- [16] Saldarriaga, V. J. (1998). *HIDRÁULICA DE TUBERÍAS*. Colombia: ISBN: 958-600-831-2.
- [17] Tutillo, R. F. (2012). *DETERMINACIÓN DE LOS PATRONES DE FLUJO EN TUBERIAS HORIZONTALES Y SELECCION OPTIMA DE TUBERÍAS DE PRODUCCIÓN PARA EL CAMPO LIBERTADOR*. Quito.
- [18] Vinuesa, L. F. (2017). *ANÁLISIS Y DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN TERMO-HIDRÁULICA DE FLUJO MULTIFASE EN CFD CON ANSYS FLUENT*. Madrid.
- [19] Zhukovski. (6 de Julio de 2020). *Wikipedia*. Obtenido de: https://es.wikipedia.org/wiki/Golpe_de_ariete