



**DISEÑO DE UN SISTEMA SIMULADOR FÍSICO DE FLUJO
MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO
SEMEJANTES A LAS REALES**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING JOSÉ LUIS GARCÍA MONTEJO
ASESOR: M. en C. DIEGO NELSON MONCADA BENAVIDES**

VILLAHERMOSA, TABASCO, 30 DE OCTUBRE DE 2019

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



28 de febrero de 2019

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno José Luis García Montejo, una vez revisada la Tesis titulada: "DISEÑO DE UN SISTEMA SIMULADOR FÍSICO DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO SEMEJANTES A LAS REALES", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestro en Manufactura Avanzada durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 28 días del mes de febrero del año 2019.

M.C. Diego N. Moncada Benavides
Asesor Académico

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Villahermosa, Tab. 15 de agosto de 2019

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Dirección de Posgrado
CIATEQ, A.C.

PRESENTE.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno José Luis García Montejó, cuyo título es:

"DISEÑO DE UN SISTEMA SIMULADOR FÍSICO DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO SEMEJANTES A LAS REALES"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el (la) alumno(a), y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

ATENTAMENTE

M.C. Fernando E. Solares Zavala
Líder de Proyectos de Sistemas de Medición CIATEQ

RESUMEN

En el presente documento se muestra la propuesta de un simulador físico de flujo multifásico agua-aire que permite recrear los regímenes de flujo dentro de tubería, con la mayor estabilidad y control de las sustancias, con ello sentar las bases para el desarrollo de equipos capaz de reproducir el flujo multifásico que puede presentarse en tuberías. Los regímenes de flujo están clasificados de acuerdo con la proporción de las sustancias, velocidad, inclinación, viscosidad; los regímenes conocidos son el flujo tipo burbuja, anular, estratificado y baches.

El diseño virtual es una herramienta de la manufactura, y que en este caso es utilizada para diseñar el simulador físico de flujo multifásico, con la comparación y validación a través de la herramienta CFD (Dinámica de fluidos computacional), a fin de llegar a obtener resultados confiables con modelos actualmente verificados. El alcance es brindar una herramienta útil para pruebas experimentales, desarrollo de investigación, CFD, desarrollo de métodos de medición, dinámica de fluidos, adquisición de datos, entre otros, en nuestro país.

Palabras clave: Simulador de flujo, flujo multifásico, régimen de flujo, diseño virtual, CFD, dinámica de fluidos, desarrollo de productos, ingeniería y tecnología, tecnología industrial, estudios industriales.

ABSTRACT

This document shows the proposal of a physical multifunction water-air flow simulator that allows recreating the flow regimes within the pipeline, with the greater stability and control of the substances, with the purpose of lay the groundwork for development of equipment capable of reproducing the multiphase flow that can occur in the pipes. The flow rates classified according to proportion of substances, speed, inclination, viscosity; The best-known regimes are bubble-type, annular, stratified and bump-type flows.

The virtual design is a manufacturing tool, and in this case, it is a simulation system, a multiphase data flow system, a credit card, a data control system, a data control system, a content management system. Reliable results with verified models now. The development is a useful tool for experimental tests, research development, CFD, development of measurement methods, fluid dynamics, data acquisition, among others, in our country.

Keywords: Flow Simulator, multiphase flow, flow rate, virtual design, CFD, fluid dynamics, development of products, engineering and technology, industrial technology, industrial studies.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR | I |
| CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR | II |
| RESUMEN | III |
| ABSTRACT | IV |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | X |
| AGRADECIMIENTOS | XI |
| GLOSARIO | XII |
| 1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA..... | 2 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN..... | 3 |
| 1.4. OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.5. HIPÓTESIS | 5 |
| 2. CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1. FLUJO MULTIFÁSICO | 6 |
| 2.1.1. Flujos multifásico verticales..... | 7 |
| 2.1.2. Flujos multifásico horizontales..... | 7 |
| 2.2. RÉGIMEN DE FLUJO..... | 9 |
| 2.2.1. Flujo de burbujas | 10 |
| 2.2.2. Flujo anular..... | 11 |
| 2.2.3. Flujo estratificado | 12 |
| 2.2.4. Flujo ondas..... | 13 |
| 2.2.5. Flujo bache (slug) | 14 |
| 2.2.6. Flujo tapón (churn)..... | 15 |
| 2.2.7. Flujo disperso..... | 16 |
| 2.3. MAPAS DE PATRONES DE FLUJOS | 17 |
| 2.3.1. Parámetro de Lockhart-Martinelli (1949)..... | 17 |
| 2.3.2. Mapa de regímenes de Baker (1954)..... | 20 |
| 2.3.3. Mapa de regímenes de Dukler..... | 21 |
| 2.3.4. Mapa de regímenes de Eaton (1949) | 22 |
| 2.4. DESAFÍOS EN LA MEDICIÓN DE FLUJO MULTIFÁSICO | 24 |
| 2.5. SIMULACIÓN CFD | 25 |
| 2.5.1. Conservación de la masa y ecuaciones de continuidad | 25 |
| 2.5.2. Teorema de Navier Stokes..... | 26 |
| 2.5.3. Teorema Euleriano y Lagrangiano | 27 |
| 2.6. DELIMITANTES DE DISEÑO | 29 |
| 2.6.1. Condiciones de frontera en los modelos cerrados..... | 29 |
| 2.6.2. Número de Reynolds | 30 |
| 2.6.3. Flujo laminar y Flujo turbulento..... | 31 |
| 2.6.4. Perfil de velocidad de flujo | 32 |
| 2.7. MÉTODO DE BEGGS & BRILL..... | 34 |
| 2.7.1. Método de Beggs y Brill | 35 |
| 2.7.2. Mapa de patrón de flujo Beggs y Brill | 36 |
| 2.7.3. Número de Froude..... | 37 |
| 2.8. GRUPOS DE FLUJO EN EL MAPA DE BEGGS & BRILL | 38 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.8.1. | Flujos multifásico segregados..... | 39 |
| 2.8.2. | Flujos multifásicos intermitentes..... | 39 |
| 2.8.3. | Flujos multifásico distribuido..... | 40 |
| 2.9. | SOFTWARE DE MODELADO CFD..... | 41 |
| 2.9.1. | La simulación CFD..... | 43 |
| 2.10. | LABORATORIO DE FLUJO MULTIFÁSICO..... | 44 |
| 2.10.1. | Circuito de flujo o Flow Loop..... | 44 |
| 2.10.2. | Circuitos de flujo estudiantil..... | 45 |
| 2.11. | LABORATORIOS DE MEDICIÓN DE FLUJOS EN MÉXICO Y EL MUNDO | 46 |
| 2.11.1. | Instituto Mexicano del Petróleo | 46 |
| 2.11.2. | Nel Flow Measurement Services | 48 |
| 2.11.3. | Fluid Control Research Institute..... | 48 |
| 2.11.4. | The Michelsen Center..... | 49 |
| 2.11.5. | Process Laboratories Netherly. (PROLAB NL) B.V. | 50 |
| 3. | CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN | 52 |
| 3.1. | DEFINICIÓN ESTRATÉGICA..... | 54 |
| 3.1.1. | Definición de objetivos | 54 |
| 3.1.2. | Documentación..... | 54 |
| 3.1.3. | Plan Estratégico..... | 55 |
| 3.2. | DISEÑO CONCEPTUAL..... | 55 |
| 3.3. | DISEÑO DE DETALLE | 57 |
| 3.4. | VALIDACIÓN | 59 |
| 3.4.1. | Estudio CDF..... | 60 |
| 4. | CAPÍTULO 4 RESULTADOS..... | 63 |
| 4.1. | CONVERSIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE BEGGS AND BRILL | 63 |
| 4.2. | GENERADOR DE BURBUJAS..... | 66 |
| 4.2.1. | Esquema Base | 66 |
| 4.2.2. | Simulación de flujo CFD..... | 67 |
| 4.2.3. | Comparación de resultados, respecto a Beggs and Brill | 68 |
| 4.3. | DISEÑO DEL SIMULADOR DE BURBUJAS..... | 70 |
| 4.3.1. | Diseño final..... | 70 |
| 4.3.2. | Modelado | 72 |
| 4.3.3. | Límites de operación | 73 |
| 4.3.4. | Materiales y costos..... | 74 |
| 4.4. | GENERADOR DEL RÉGIMEN ANULAR | 74 |
| 4.4.1. | Esquema Base | 75 |
| 4.4.2. | Simulación de flujo CFD..... | 76 |
| 4.4.3. | Comparación de resultados, respecto a Beggs and Brill | 77 |
| 4.5. | DISEÑO DEL SIMULADOR ANULAR | 79 |
| 4.5.1. | Diseño final..... | 79 |
| 4.5.2. | Modelado | 81 |
| 4.5.3. | Límites de operación | 82 |
| 4.5.4. | Materiales y costos..... | 83 |
| 4.6. | GENERADOR TIPO BACHES | 84 |
| 4.6.1. | Esquema Base | 84 |
| 4.6.2. | Simulación de flujo CFD..... | 85 |
| 4.6.3. | Comparación de resultados, respecto a Beggs and Brill | 86 |
| 4.7. | DISEÑO DEL SIMULADOR TIPO BACHES | 88 |
| 4.7.1. | Diseño final..... | 88 |
| 4.7.2. | Modelado | 89 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4.7.3. | Límites de operación | 90 |
| 4.7.4. | Materiales y costos..... | 91 |
| 4.8. | GENERADOR TIPO ESTRATIFICADO | 91 |
| 4.8.1. | Esquema base..... | 92 |
| 4.8.2. | Simulación de flujo CFD..... | 93 |
| 4.8.3. | Comparación de resultados, respecto a Beggs and Brill | 94 |
| 4.9. | DISEÑO DEL SIMULADOR TIPO ESTRATIFICADO | 96 |
| 4.9.1. | Diseño final..... | 96 |
| 4.9.2. | Modelado | 98 |
| 4.9.3. | Límites de operación | 99 |
| 4.9.4. | Materiales y costos..... | 99 |
| 4.10. | CASOS DE ESTUDIO | 100 |
| | CONCLUSIONES | 103 |
| | APORTACIONES DE LA TESIS | 105 |
| | RECOMENDACIONES | 106 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 107 |
| | ANEXOS | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Mapa de correlación de Beggs & Brill (1973) para flujo horizontal multifásico. ... | 9 |
| Figura 2 Regímenes de flujo horizontal multifásico..... | 10 |
| Figura 3 Fases intermedias del régimen de burbujas. | 11 |
| Figura 4 Flujo anular y espesor de la película interna. | 12 |
| Figura 5 Flujo estratificado. | 13 |
| Figura 6 Flujo de ondas. | 13 |
| Figura 7 Esquema de flujo de ondas de Hanratty..... | 14 |
| Figura 8 Esquema de flujo de babosas o slug. | 15 |
| Figura 9 Régimen de flujo tapón (churn). | 16 |
| Figura 10 Régimen de flujo disperso. | 16 |
| Figura 11 Correlaciones entre la fracción de vacío y la caída de presión por fricción Lockhart – Martinelli..... | 19 |
| Figura 12 Mapa de patrones de flujo horizontal de Baker, 1954..... | 20 |
| Figura 13 Mapa de patrones de flujo horizontal de Dukler | 21 |
| Figura 14 Factor de pérdida de energía..... | 24 |
| Figura 15 Ecuaciones de conservación de energía. | 26 |
| Figura 16 Esquema de inestabilidad de flujo. | 29 |
| Figura 17 Condiciones de frontera que limita a los modelos matemáticos. | 30 |
| Figura 18 Número de Reynolds y forma del flujo. | 31 |
| Figura 19 Flujo laminar (izquierda) y flujo turbulento(derecha)..... | 32 |
| Figura 20 Perfil de flujo. | 32 |
| Figura 21 Perfil de flujo en función del radio..... | 33 |
| Figura 22 Perfil de flujo en función del radio y longitud..... | 34 |
| Figura 23 Modelo experimental de Beggs & Brill 1973..... | 35 |
| Figura 24 Mapa de regímenes de Flujo Beggs y Brill. | 37 |
| Figura 25 Regímenes segregados..... | 39 |
| Figura 26 Regímenes intermitentes. | 40 |
| Figura 27 Mapa de regímenes distribuido..... | 41 |
| Figura 28 Uso de software de simulación CFD..... | 42 |
| Figura 29 Circuito de largo flujo en el laboratorio de SINTEF de Noruega. | 45 |
| Figura 30 Circuito de flujo del Institute for Energy Technology en Noruega. | 46 |
| Figura 31 Laboratorio de Medición Multifásico del Instituto Mexicano del Petróleo en Pachuca Hidalgo. | 47 |
| Figura 32 Laboratorio de NEL Flow Measurement services en Reino Unido | 48 |
| Figura 33 Laboratorio de Medición Multifásico del Instituto de control del Fluidos en India..... | 49 |
| Figura 34 Laboratorio The Michelsen Center, en Noruega..... | 50 |
| Figura 35 Laboratorio de Medición Multifásico PROLAB NL..... | 51 |
| Figura 36 Fases del procedimiento de investigación..... | 53 |
| Figura 37 Propuesta inicial del diseño del simulador de flujos multifásico. | 56 |
| Figura 38 Selección de materiales y costos del diseño de un carrete simulado..... | 57 |
| Figura 39 Diseño de detalle en la propuesta..... | 58 |
| Figura 40 Ensamble de un carrete, en la fase del diseño detallado del modelo. | 59 |
| Figura 41 Ejemplo del modelado por CFD para observar el comportamiento de los regímenes de flujo..... | 61 |
| Figura 42 Hoja de cálculo Checalc, método de Beggs and Brill y régimen de flujo. | 63 |

| | |
|---|-----|
| Figura 43 Propuesta base para inducir un flujo burbujas..... | 66 |
| Figura 44 Resultados CFD para el generador de burbujas (anexo b)..... | 67 |
| Figura 45 Comparación del CFD y Mapa de Beggs and Brill..... | 69 |
| Figura 46 Diseño final, carrete simulador de flujo burbujas. | 71 |
| Figura 47 Características del simulador de flujo de régimen burbujas..... | 72 |
| Figura 48 Modelo del simulador de flujo de régimen burbujas..... | 72 |
| Figura 49 Generador de burbujas con agua a 50 ft ³ /h y aire a 0.01ft ³ /h. | 74 |
| Figura 50 Propuesta base para inducir el flujo anular..... | 75 |
| Figura 51 Resultados CFD para el generador de flujo anular (anexo f)..... | 76 |
| Figura 52 Simulación de velocidad de la mezcla. | 77 |
| Figura 53 Comparación del CFD y Mapa de Beggs and Brill..... | 78 |
| Figura 54 Diseño final, carrete simulador de flujo anular. | 80 |
| Figura 55 Características del carrete simulador de flujo de régimen anular..... | 81 |
| Figura 56 Modelado del carrete simulador de flujo de régimen anular. | 81 |
| Figura 57 Simulación de flujo de régimen anular. | 82 |
| Figura 58 Flujo anular con agua a 0.05 ft ³ /h y aire a 10 ft ³ /h. | 83 |
| Figura 59 Propuesta base para inducir un flujo baches..... | 84 |
| Figura 60 Resultados CFD para el generador tipo baches (anexo j). | 85 |
| Figura 61 Comparación del CFD y Mapa de Beggs and Brill..... | 87 |
| Figura 62 Diseño final, carrete simulador de flujo baches. | 89 |
| Figura 63 Características del carrete simulador de flujo de régimen baches..... | 89 |
| Figura 64 Modelado del carrete simulador de flujo tipo bache..... | 90 |
| Figura 65 Generador de flujo tipo bache. | 91 |
| Figura 66 Propuesta base para inducir un flujo estratificado..... | 92 |
| Figura 67 Resultados CFD para el generador estratificado (anexo n)..... | 93 |
| Figura 68 Comparación del CFD y Mapa de Beggs and Brill..... | 95 |
| Figura 69 Diseño final, carrete simulador de flujo estratificado. | 97 |
| Figura 70 Características del carrete simulador de flujo estratificado. | 97 |
| Figura 71 Modelado del carrete simulador de flujo tipo estratificado..... | 98 |
| Figura 72 Generador estratificado con agua a 0.05 ft ³ /h y aire a 0.05 ft ³ /h. | 99 |
| Figura 73 Propuesta del simulador multifásico con accesorios adicionales..... | 101 |
| Figura 74 Modelo de caracterización de la Tampere University of Technology. | 102 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1 Dependencia de la constante C en el parámetro de correlación de Lockhart – Martinelli | 18 |
| Tabla 2 Ejemplo de tabla de resultados de las pruebas de flujo a diversas condiciones, y comparativo al mapa topológico de regímenes de flujo. | 61 |
| Tabla 3 Tabla de variables aplicadas en la prueba de simulación CFD | 64 |
| Tabla 4 Conversión de la topología de Beggs and Brill (comparación para la prueba CFD)..... | 65 |
| Tabla 5 Límites de operación para simular flujo burbujas..... | 73 |
| Tabla 6 Límites de operación para simular flujo anular | 82 |
| Tabla 7 Límites de operación para simular flujo tipo baches..... | 90 |
| Tabla 8 Límites de operación para simular flujo estratificado..... | 99 |
| Tabla 9 Costo estimado del prototipo..... | 104 |

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a CIATEQ por la oportunidad de formar parte del programa de postgrado, y a las personas que intervinieron en este largo proceso ya que gracias a su apoyo moral me permitieron permanecer con empeño, dedicación a seguir una meta complicada. A todos los maestros y compañeros una que contribuyeron con sus conocimiento y experiencias, y más importante, su inigualable amistad.

Al iniciar parecía un reto y finalizar una satisfacción, ha transcurrido un largo tiempo entre estos eventos, pero construir un trabajo de grado es satisfactorio compartiéndolo con quienes son importantes para mí.

GLOSARIO

Centipoise: Es una unidad para medir la viscosidad dinámica, equivale a 1 centésima parte de un Poise ($1 \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm})^{-1} \equiv 1 \text{ dina} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2} \equiv 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$). El agua tiene una viscosidad de 1,0020 cP a 20 °C.

CFD: (Dinámica de fluidos computacional) Una herramienta utilizada en el análisis dinámico de fluidos por computadora que permite una simulación rápida y eficaz del flujo de fluidos y de la transferencia de calor.

Circuito de flujo: Es un sistema de tubería por el cual circula un fluido que es impulsado y regresado por la tubería a la succión. En él se desarrollan experimento e investigación de fenómenos producido por el transporte y la configuración del tubo y sus elementos, la presión, la temperatura o sólidos suspendidos.

Coalescencia: Unión de las partículas en suspensión coloidal o de las gotitas de una emulsión para formar granos o gotas mayores.

Discretizar: Es seccionar en partes a un nivel insignificante con el propósito de analizar por modelos matemático la transferencia de energía y masa entre cada una de las partes.

Escala logarítmica es una escala de medida que utiliza el logaritmo de una cantidad física en lugar de la propia cantidad. Un ejemplo sencillo de escala logarítmica muestra divisiones igualmente espaciadas en el eje vertical de un gráfico marcadas con 1, 10, 100, 1000, ... en vez de 0, 1, 2, 3, ...

Fases: Puede referirse en fluidos cómo estados de agregación (líquido, gas) aunque pueden arrastrar partículas sólidas en suspensión.

Mensurado: es una magnitud, la cantidad del objeto de medida, la porción que se somete a cuantificación, previa comparación con un patrón que aporta la información requerida.

Monofásico: Una sustancia en un solo estado de agregación. Sea líquido o gas.

Multifásico: Es una mezcla de sustancias en estado líquidos, sólido y gas, se relaciona con el fluido petrolífero que lleva agua, aceites, gas y partículas sólidas.

Operacionalización: Dentro de la investigación, es un proceso de definición de los fenómenos que no se puede medir directamente, aunque su existencia se infiere de otros fenómenos.

Patrón de flujo o régimen de flujo: está definido por la combinación del efecto de gravedad, el efecto de viscosidad en los fluidos, la velocidad de las sustancias y la razón de la mezcla.

Perfil de flujo: La forma con la cual se desarrolla el flujo en una sección de tubería.

Régimen o Régimen de flujo: Perfil de flujo.

Traspaso de custodia: Punto donde se acuerdan sin conflictos de interés que un producto pasa de un propietario a otro de modo continuo.

1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

Durante la vida productiva de un yacimiento petrolífero los productos se extraen en dos estados físicos de agregación y varían proporcionalmente a lo largo del tiempo, el transporte se realiza a través de tuberías y en el traslado se producen diversos fenómenos que a su vez pueden afectar la medición del fluido. En México, para monitorear en tiempo real la producción de yacimientos, se utilizan medidores a boca de pozo, los cuales son costosos y tienen una incertidumbre mayor a los medidores de una sola fase o se utilizan separadores bifásicos o trifásicos, los cuales de igual manera son costosos y requieren de espacio para colocar la infraestructura necesaria.

Actualmente a nivel internacional, en la medición de flujo multifásico se utilizan diversos principios de medición dentro de la metrología, por lo cual, los avances tecnológicos tienen como objetivo desarrollar dispositivos con mayor precisión y menor grado de incertidumbre a los existentes.

Por lo que, el propósito del presente trabajo es diseñar un simulador de flujo multifásico de fenómenos controlados, que permita la experimentación de condiciones de flujo semejante a las reales; así mismo, que los resultados sean fuente de futuros trabajos de investigación y divulgación en el tema de medición multifásico y, por consiguiente, que México participe del desarrollo de patentes y de la transferencia de nuevas tecnologías en esta área de estudio entre países.

1.1. ANTECEDENTES

En México la investigación y el desarrollo del tema de flujo multifásico está en crecimiento, sin embargo, la producción científica y los desarrollos tecnológicos en esta área, son limitados en comparación con los países como Noruega, China y Estados Unidos.

El centro de investigación Avanzada CIATEQ, proporciona en nuestro país los servicios de verificación de sistemas de medición de flujos; por otro lado, el Centro Nacional de metrología (CENAM) cuenta con un simulador didáctico para la demostración de flujo por medio de placa de orificio, anexo (a), el Centro de Tecnología para Aguas Profundas (CTAP) del IMP en Boca del Río, Veracruz, (1) cuenta en sus laboratorios con un circuito de flujo de alta presión, en cual se reproducen de manera experimental condiciones extremas para la extracción de crudo, estas instalaciones son pioneras en México y requieren gran aportación de recursos económicos.

Lo que motivó la presente investigación de tesis, deriva notar la diferencia entre los ponentes mexicanos que presentan investigaciones sobre temas de fluidos, generalmente de modo documental, o modelos matemáticos por software. En mi asistencia al Workshop of fluid flow multiphase measurement en Querétaro, de enero de 2017, y los congresos nacionales de Ciudad de Carmen Campeche 2018, con presencia de investigadores internacionales, en el cual fue notable que los temas presentados, fueron desarrollos experimentales en bancos de pruebas, en búsqueda de nuevos modelos y recreación de problemáticas industriales.

Este desarrollo de tesis permitirá a CIATEQ y sus investigadores modelar flujos multifásico semejantes a los reales, de forma controlada y constante, para elaborar prácticas experimentales, considerándolo como una herramienta de laboratorio de flujo multifásico simulado y lograr beneficios por la transferencia de conocimientos, publicaciones científicas y atender los problemas reales de la industria petrolera.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

México tiene bajos índices de registros de patentes, respecto a países desarrollados, de acuerdo con los datos del Banco mundial, México en el 2016 alcanzó 14 529 publicaciones en el lugar 24; en tanto que China lideró con 426 165, Estados unidos 408 985, India 110 320, seguidos de Alemania, Reino

Unido, Japón. México registró en 2016 1.334 millones de solicitud de patentes en comparación con China con 1 245 millones. Por lo que, el diseño de un sistema simulador físico de flujo multifásico fomentará el desarrollo académico de trabajos de investigación. La infraestructura en México para investigar fluidos es mínima, son pocos los institutos de investigación reconocidos que tienen los equipos especiales para modelar fenómenos multifásico, cómo el IMP, CENAM y la UNAM. La CNH establece los requerimientos básicos para la instalación de medidores multifásico Resolución CNH.06.001/11.

EL reto del flujo multifásico es poder medir con menor error las fases, de las sustancias contenidas en un flujo de fluidos, actualmente la menor incertidumbre de un medidor multifásicos en el mercado es del 5%.

Por lo que, el diseño de una propuesta de simulador de flujo multifásico viable y válido respecto a las topologías de regímenes existentes, contribuirá a la investigación y desarrollo tecnológico que se realiza en México a través de los requerimientos solicitados por el CIATEQ en el área de Sistemas de Medición.

1.3. JUSTIFICACIÓN

CIATEQ cuenta con un área dedicada a los Sistemas de Medición y dentro de su plan institucional 2019-2020, proyecta la construcción de un simulador físico de flujo multifásico para el desarrollo, investigación y experimentación de fenómenos relacionados con la medición de fluidos, monofásico y multifásicos con el propósito de mejorar la competencia científica y tecnológica para México.

Esta tesis se centra en la presentación de un diseño viable de un conjunto de carretes mezcladores de fases para la generación inducida de flujos multifásicos. Simular un flujo multifásico tienen las siguientes ventajas: se requiere menor secciones de tubería para el desarrollo de los patrones de

flujo, se puede controlar el régimen de flujo de manera constante y con el uso del CFD es posible establecer nuevos modelos matemáticos para la investigación de fluidos multifásicos, su interacción y comportamiento cómo mezcla heterogénea.

Lo anterior permitirá solventar las actuales necesidades de la industria petrolera y la falta de avances científicos en el país, contribuyendo al desarrollo de las capacidades tecnológicas en el área de flujos multifásico en México, a través de una plataforma que permita reproducir condiciones de flujo semejantes a las reales.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general:

- Diseñar un Simulador Físico de Flujo Multifásico de Fenómenos Controlados para generar los fenómenos usuales en la medición de fluidos.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Identificar modelos de diseño para los carretes “mezcladores” de regímenes de flujo con dos fases (agua y aire) y establecer el fundamento principal de operación de dispositivos similares.
- Seleccionar los materiales, elementos e instrumentos que cumplan con los alcances de operación para que los carretes mezcladores permitan desarrollar los diferentes patrones de flujo.
- Utilizar la simulación por CFD y comparar la distribución de regímenes multifásico de Beggs & Brill cómo la ubicación del régimen de flujo desarrollado por los carretes mezcladores.
- Determinar los límites de operación en el diseño de los carretes mezcladores para tener la mejor estabilidad de los regímenes de flujo dentro de la topología de Beggs & Brill.

- Presentación del diseño final de los carretes mezcladores de flujo multifásico, sus partes, explodido y el resultado de los patrones de flujo.
- Describir protocolos de pruebas de flujo en dos fases.

1.5. HIPÓTESIS

El diseño del simulador de flujo multifásico generará regímenes de flujo de correspondiente a la clasificación topológica de Beggs & Brill (1978).

Operacionalización:

- Presentar visualmente cómo es la distribución del líquido (agua) y gas (aire) durante el flujo de las sustancias.
- Representar cómo un mapa de regímenes de flujo los resultados de la evaluación por CFD para cada carrete de simulación de patrones.
- Establecer los límites de operación de cada carrete de simulación de patrones de flujo.

2. CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

La medición de flujo multifásico es un proceso complejo, en la extracción de los recursos petrolíferos, el problema radica en medir cada una de las sustancias de acuerdo con su estado de agregación, saliendo mezclados en la tubería vertical u horizontal, donde se producen regímenes de flujo diversos.

Durante la extracción de petróleo la viscosidad del fluido, la formación de bolsas de gas, y a la presencia de agua, suben a la superficie en lo que se denomina flujo multifásico en pozos de petróleo.

A través del tiempo se han creado modelos de mapas que permiten clasificar los distintos patrones de flujo presentes en tuberías con flujo bifásico considerando las correlaciones entre los flujos. Los patrones de flujo se identifican en un mapa de flujo, de acuerdo con sus características morfológicas, generadas mediante datos experimentales y observaciones (2).

La ciencia ha buscado y encontrado modelos matemáticos que describen el comportamiento de los fluidos, que junto con las herramientas computacionales se pueden modelar virtualmente, y aproximarse a la realidad cómo si se observara de la naturaleza.

2.1. FLUJO MULTIFÁSICO

El flujo multifásico se refiere al flujo de fluido de una fase o componente que se relaciona con otro flujo de fluido en otra fase o componente, no considera aquellas mezclas a nivel molecular, por lo tanto, se refiere a flujos de gas / sólidos, o flujos de líquido / sólidos, etc. (3).

Los fluidos multifásico pueden ser denominados flujos de dos fases (bifásicos) o de tres fases (gas, aceite, el agua) cómo flujo trifásico.

Los hidrocarburos son transportados y trasegados desde la extracción por medio de tuberías y alcanzan a viajar desde metros hasta kilómetros, mayormente debajo de la superficie tierra o del agua.

Durante el transporte los fluidos son afectados por la temperatura y presión, que originan un cambio de estado físico de agregación, viscosidad, densidad y ocasiona alteraciones en el régimen mismo de flujo.

2.1.1. Flujos multifásico verticales

El flujo multifásico vertical cómo se indica es aquel que viaja en tuberías orientadas en posición vertical, que, por coacción de la gravedad, afecta directamente a los fluidos dentro del conducto, además de los efectos de la viscosidad, tensión superficial y densidad, se generan diferentes velocidades de ascenso o descenso entre las sustancias.

Los flujos multifásico verticales generan regímenes de flujo diferentes de los encontrados en flujos horizontal, flujo inclinado y flujo direccional.

Los flujos verticales tienen sus propias complejidades en el campo de la industria petrolera (4), debido a que es la forma del primer flujo que sale de los yacimientos, por ejemplo:

- La energía en el fluido va disminuyendo en mayor medida en el transporte de fluidos en el flujo vertical que el horizontal.
- Se aprovecha en flujos multifásico verticales la energía dentro del pozo para el transporte del fluido desde el reservorio hasta el cabezal.

2.1.2. Flujos multifásico horizontales

Los fluidos multifásico horizontales son los úsales en la industria y son los caracterizados por métodos experimentales (3); Se desarrollan durante el transporte en secciones horizontales de tubería que, durante su avance, las

sustancias se agrupan y viajan a diferente velocidad mientras no existen elementos que provocan perturbación.

Mediante las correlaciones del gradiente de presión de las sustancias dentro de tubería horizontal, se destacan las 5 correlaciones por la clasificación de acuerdo con el caudal y diámetros de tubería. (5)

- **Lockhart-Martinelli (1949)** Utilizada para gastos bajos de gas y aceite: en diámetros pequeños de 2".
- **Baker (1954)** Para diámetros de tubería mayores de 6" aunque los datos fueron tomas de tubería de 8" y 10 ", A diferencia de Lockhart y Martinelli, Baker maneja el concepto de patrones de flujo y ecuaciones para cada patrón.
- **Dukler (1964)** Correlacionó en dos partes las ecuaciones de flujo multifásico horizontal denominados caso I y caso II. Recopiló todas las publicaciones y formó un banco de datos, datos de laboratorio de tubería corta y datos de campo de largos tramos de tubería con aceite (6).
- **Eaton (1966)** Las pruebas presentadas son de tubería horizontal de las instalaciones de Union Oil Company de California, dos pruebas de 1700 ft en líneas de 2" y 4". Fue caracterizado en secciones largas de tubería para que represente las condiciones de campo.
- **Beggs y Brill (1973)** Estableció mediante 584 pruebas y un arreglo de a pequeña escala de 1" y 1.5" de diámetro en acrílico, 90 pies de longitud, con un mecanismo para inclinar la tubería y con fluidos de agua y aire, se muestra en la Figura 1.

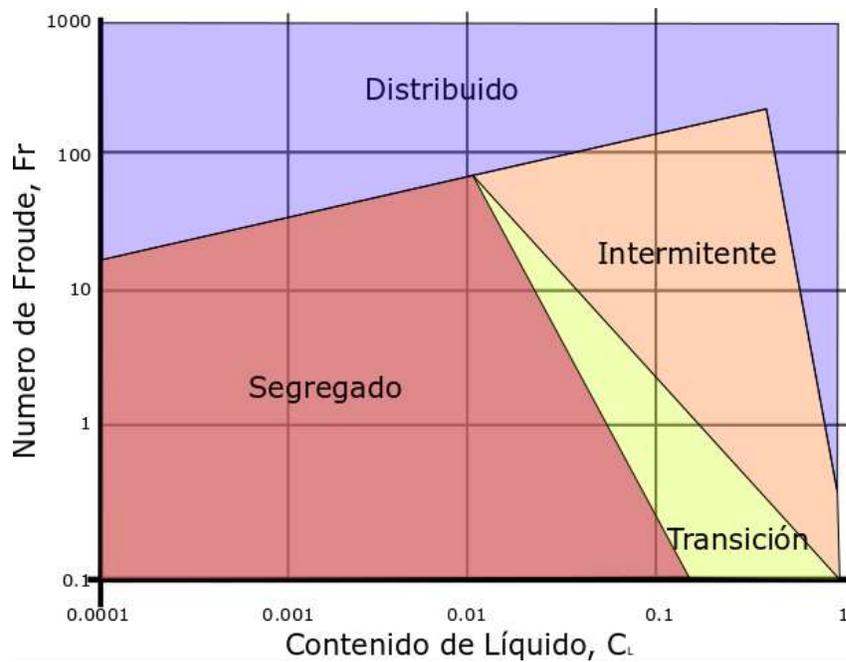


Figura 1 Mapa de correlación de Beggs & Brill (1973) para flujo horizontal multifásico.

Fuente: Elaboración propia del mapa presentado por Beggs & Brill (1973)

2.2. RÉGIMEN DE FLUJO

El flujo multifásico se clasifica de acuerdo con la geometría en patrones de flujo o régimen de flujo, se reconocen visualmente dentro de la tubería, aunque se puede idealizar de acuerdo con sus condiciones de operación: presión, el volumen, el caudal de la sustancia, densidad, viscosidad y tensión superficial.

Los regímenes de flujo son clasificados esquemáticamente en función de razón de flujos de mezclas de gas y líquido, horizontal o vertical. Este mapa esquemático de patrones de flujo creado por Beggs & Brill (1973), se observa en la Figura 2. Los límites entre los patrones son zonas en las cual la mezcla se vuelve inestable y el difícil diferenciar uno y otro régimen (3).

Los regímenes de flujo horizontal que se pueden catalogar son los siguientes:

- Estratificado
- Estratificado de olas u ondulante
- De bache
- De tapón
- Flujo con burbujas dispersas
- Flujo anular



Figura 2 Regímenes de flujo horizontal multifásico.
Fuente: Elaboración propia.

Se han manejado diversas técnicas que determinan los límites entre una configuración de flujo y otra, sin embargo, resulta poco confiable demostrarlo visualmente, por la interacción similar presente entre dos o más regímenes.

Resulta contradictorio, pero los desarrollos y publicaciones se basaron en la observación de fluido en tránsito. Mediante el esquematizado de mapas de regímenes se puede suponer su formación dentro de tuberías no transparentes, cómo se muestra en la Figura 2.

2.2.1. Flujo de burbujas

En un sistema de dos fases, se generan burbujas de gas suspendidas en el líquido. En este régimen de flujo hay formación de fases intermedias que se pueden observar en el desplazamiento y se deforman conforme el avance de tiempo.

De acuerdo con estas interfaces, el flujo de burbujas se clasifica en cuatro regímenes de flujo diferentes, Figura 3: (7)

- a) Flujo de burbujas separados uniformemente
- b) Flujo de burbujas interactuó
- c) Flujo de burbujas turbulento
- d) Flujo de burbujas agrupadas

Las burbujas normalmente son del tamaño de 1 mm, las cuales viajan separadas uniformemente, que se agrupan para formar burbujas grandes.

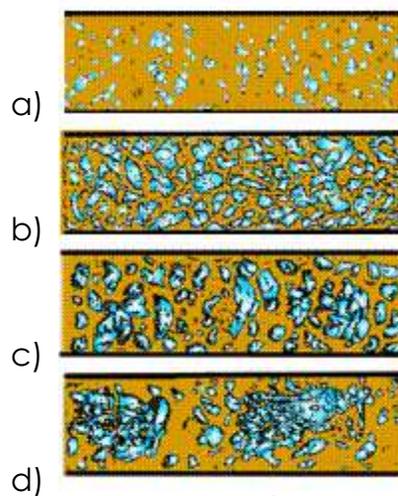


Figura 3 Fases intermedias del régimen de burbujas.
Fuente: www.thermopedia.com

2.2.2. Flujo anular

El flujo anular es característico del flujo de gas cargado con gotas a altas velocidades que se trasladan en el núcleo central del fluido confinado en una fina película adherida en las paredes de la tubería.

La fracción de fase gaseosa como regla excede del 75-80%. La película que corre por la pared en los flujos horizontales no es uniforme alrededor de la tubería (8).

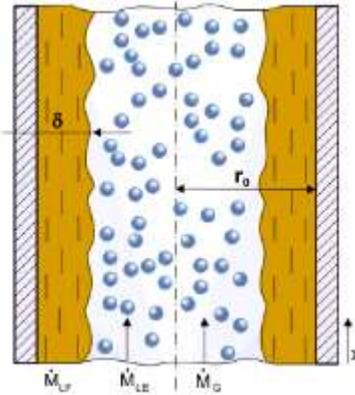


Figura 4 Flujo anular y espesor de la película interna.
Fuente: www.thermopedia.com

El espesor δ de la película líquida se determina por la fracción de (MLF) líquidos de la pared y (M_g) el caudal de gas en el núcleo crea una tensión superficial y solo arrastra el exceso de líquido. cómo se muestra en la Figura 4.

Cuando la superficie de la película es demasiado gruesa comienza a formarse ondas y desprendimientos de gotas, que a su vez viaja en la tubería y se deposita nuevamente en la pared.

2.2.3. Flujo estratificado

El flujo estratificado ocurre en tuberías horizontales cuando las fases se separan debido a la atracción gravitatoria. Este régimen de flujo se caracteriza por la baja velocidad de las sustancias cómo se observa en la Figura 5, aunque es mucho más común en tubería inclinadas. Al aumentar la velocidad del gas se puede apreciar ondas regulares de pequeña amplitud. Ante un aumento de velocidad del gas se forman gotas de arrastre que pueden depositarse en la pared (9).



Figura 5 Flujo estratificado.
Fuente: Elaboración propia.

Los flujos estratificados pueden alcanzar una diferencia entre las velocidades de la fase alta, lo que sugiere que el gas no impulsa al líquido. Cuando la velocidad del gas aumenta, las ondas se desarrollan en la superficie a través de un mecanismo de inestabilidad Kelvin-Helmholtz.

2.2.4. Flujo ondas

En este régimen de flujo las corrientes viajan de manera paralelas, el gas y el líquido fluyen juntos, sus velocidades son relativamente bajas. Considerando velocidades de gas más altas, se vuelve inestable y produce pequeñas perturbaciones y olas como se aparecía en la Figura 6.

El flujo de ondas es común, como en las olas en el mar, dependiendo de la geometría y las velocidades de flujo de los fluidos, las ondas interfases pueden tomar una variedad de formas y tamaños.



Figura 6 Flujo de ondas.
Fuente: Elaboración propia.

Los regímenes de flujo tipo ondas en tubería horizontal fueron clasificados por Hanratty en 1983, en la Figura 7 se observa cómo una función de la velocidad del aire y el número de Reynolds del líquido, Re_L , en base a la velocidad promedio y el diámetro hidráulico (10).

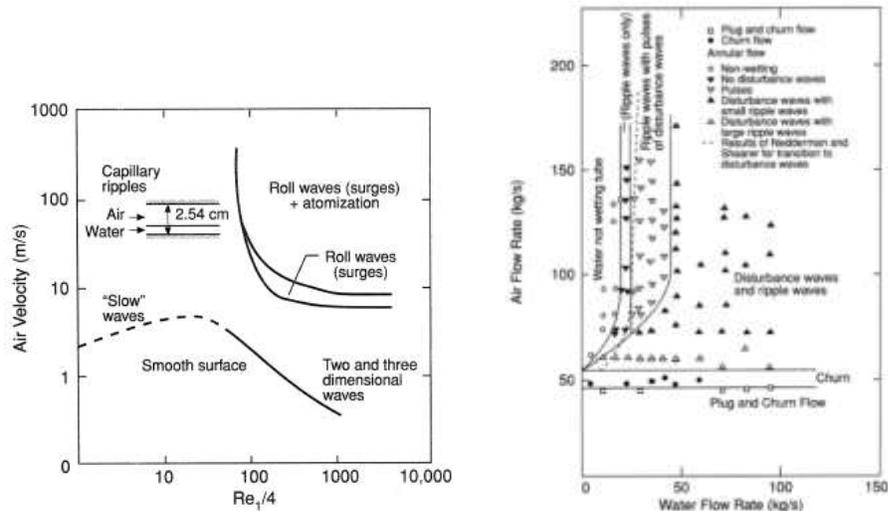


Figura 7 Esquema de flujo de ondas de Hanratty.
Fuente: www.thermopedia.com

Las características distintivas de este flujo son las ondas de perturbación que son intermitentes y tienen una amplitud de hasta cinco veces el grosor medio de la película.

2.2.5. Flujo bache (slug)

El flujo slug (baches o babosas en español) por el paso de una burbuja larga, e irregular, semejante al paso una medusa, seguida de pequeñas burbujas, las secciones de flujo van separados dentro de burbujas largas, cómo se observa en la Figura 8.

Se desarrolla usualmente en mezclas donde los líquidos tienen mayor viscosidad, en tuberías en ascenso, donde el paso de burbuja es suave y con arrastre de pequeñas burbujas.

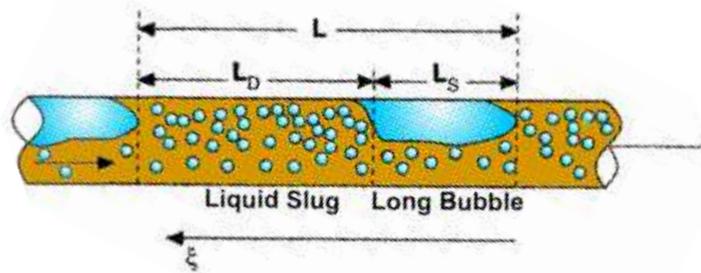


Figura 8 Esquema de flujo de babosas o slug.
Fuente: www.thermopedia.com

La burbuja viaja a una velocidad mayor que sobrepasa al líquido en movimiento. Para tubos horizontales el líquido se aloja en la parte inferior y parcialmente los baches forman una capa estratificada. En tubería vertical el líquido forma una película anular que cae y acelera a medida que se mueve hacia abajo. La mayor parte del gas se transporta las burbujas de gas (11).

2.2.6. Flujo tapón (churn)

Es un régimen de flujo irregular donde el gas se desplaza dentro de la tubería de manera caótica. El flujo produce una mezcla espumosa. A diferencia del flujo slug, no se aprecia una fase continua u homogénea. Ver la imagen de la Figura 9.



Figura 9 Régimen de flujo tapón (churn).
Fuente: Elaboración propia.

Este régimen puede considerarse cómo una transición, este flujo es una condición de flujo intermedio entre el flujo slug y el flujo de niebla o disperso y se produce a una velocidad relativamente alta del gas (3). A medida que la velocidad del gas aumenta, cambia a flujo anular.

2.2.7. Flujo disperso

El flujo disperso es el régimen donde la fase líquida viaja en forma de niebla dentro de la fase gaseosa. En presencia de partículas sólidas se produce arrastre de manera continua dentro de fase líquida o gas. En este caso, el grupo de partículas sólidas se comportan cómo en la fase continua y, por lo tanto, dicha configuración puede llegar a producir patrones de flujo tipo bache o tapón. En la Figura 10 se observa el modelo de flujo disperso (12).



Figura 10 Régimen de flujo disperso.
Fuente: Elaboración propia.

2.3. MAPAS DE PATRONES DE FLUJOS

Los patrones de flujo han sido caracterizados mediante la realización de pruebas experimentales. En todas las pruebas se deben controlar las variables de influencia y deben ser comprobada su repetibilidad con los resultados, y ya que únicamente se puede diferenciar los resultados a través de observación. Hay diversos autores que presentan regímenes de flujo, en el cual, demuestran la veracidad de su modelo de experimentación y sus resultados son aproximados por un modelo matemático. Normalmente los modelos son realizados con mezclas bifásicas, y las sustancias utilizada es agua y aire, con tubería transparente, con cierta inclinación del sistema.

Los regímenes de flujo están representados cómo mapas topológicos, con áreas delimitadas dentro de un diagrama, cuyas coordenadas son dimensiones de variables de influencia, y van relacionados a ciertas modelos matemáticos que los describen; los mapas topológicos conocidos y utilizados se describen a continuación.

2.3.1. Parámetro de Lockhart-Martinelli (1949)

En 1949 Lockhart, R. W., y R. C. Martinelli proponen un parámetro de correlación entre los patrones de flujo donde hay una diferencia de presión y de velocidad entre dos sustancias aun viajando en el mismo ducto. El método de Lockhart - Martinelli se utiliza para predecir la caída de presión por fricción de dos fases basada en una variante entre la fricción para la fase líquida, o la fase de gas. Ecuación 1.

$$\Delta p_{fricc} = \phi_{ltt} \cdot \Delta p_l$$

$$\Delta p_{fricc} = \phi_{gtt} \cdot \Delta p_g$$

Para las dos fases calculamos:

$$\Phi_{Ltt}^2 = 1 + \frac{C}{X_{tt}} + \frac{1}{X_{tt}^2}, \quad \text{para } Re_L > 4000$$

$$\Phi_{Gtt}^2 = 1 + CX_{tt} + X_{tt}^2, \quad \text{para } Re_L < 4000$$

Ecuación 1

Donde:

- Φ_{Ltt}^2 Correlación de la fase líquida
- Φ_{Gtt}^2 Correlación de la fase gaseosa
- C Constante dependiente del flujo
- x_{tt} Parámetro de Martinelli

El factor monofásico sea líquido f_l o en gas f_g están basados en una sola fase que fluye en la tubería, sea en régimen laminar (ν) viscoso o turbulento. El parámetro de Martinelli se define como la x_{tt} y se muestra en la Ecuación 2.

$$x_{tt} = \left(\frac{(1-x)}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0.1}$$

Ecuación 2

Donde:

- x Parámetro x de la gráfica (figura 11)
- ρ_G Densidad de la fase gaseosa
- ρ_L Densidad de la fase líquida
- μ_L Viscosidad de la fase gaseosa
- μ_G Viscosidad de la fase líquida

En el cual la constante C de la ecuación depende del régimen de flujo del líquido y el gas mostrado en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1 Dependencia de la constante C en el parámetro de correlación de Lockhart – Martinelli

| Líquido | Gas | C |
|------------|------------|----|
| Turbulento | Turbulento | 20 |
| Laminar | Turbulento | 12 |
| Turbulento | Laminar | 10 |
| Laminar | Laminar | 5 |

La correlación Lockhart-Martinelli se utiliza en flujos de dos fases a presiones bajas y moderadas. Para aplicaciones a presiones altas, se recomiendan los modelos revisados de Martinelli y Nelson (1948) y Thom (1964).

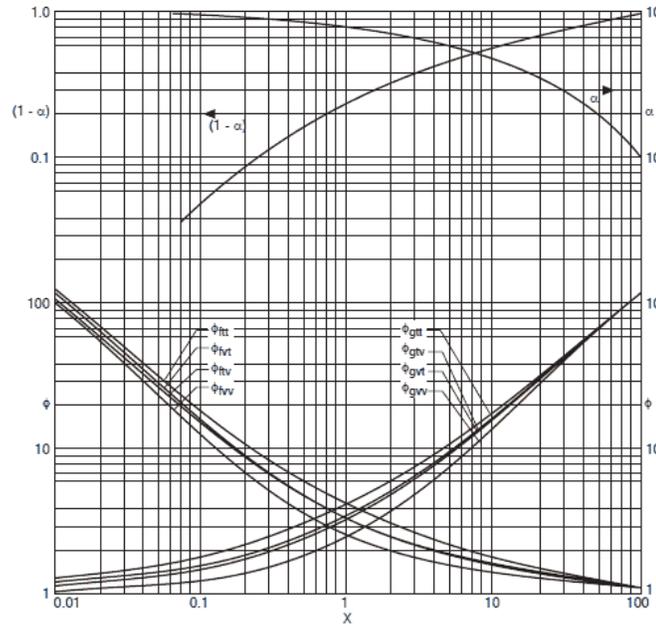


Figura 11 Correlaciones entre la fracción de vacío y la caída de presión por fricción Lockhart – Martinelli.

Fuente: Correlación de Lockhart – Martinelli (3)

- **La caída de presión por mezcla de dos fases:** La pérdida de presión es debida a efectos viscosos a lo largo de la longitud de una tubería, así como las pérdidas adicionales de otros accesorios como válvulas, codos, entradas de tuberías, etc.
- **Caída de presión en sustancias homogéneas:** Es simple la predicción de flujos multifásico, si se considera que el todo equivale a un líquido, excepto que fluye a la velocidad de la mezcla de dos fases. Las caídas de presión de dos fases para flujos dentro de tuberías y canales son la suma de tres contribuciones:

$$\Delta\rho_{total} = \Delta\rho_{esta.} + \Delta\rho_{mom} + \Delta\rho_{fricc}$$

Ecuación 3

- La caída de presión estática $\Delta\rho_{esta.}$ (altura de elevación)
- La caída de presión por la aceleración $\Delta\rho_{mom}$ (aceleración del fluido)
- La caída de presión de fricción $\Delta\rho_{fricc}$

2.3.2. Mapa de regímenes de Baker (1954)

Baker, quien definen el mapa de regímenes de flujo horizontal conocido por su nombre en 1954, y es el usado en la industria petrolera y se considera la topología clásica de flujo multifásico. En la Figura 12 se muestra el mapa que obtuvo Baker con mezcla multifásica a base de agua y aire a presión atmosférica, con una tubería de 1", 2" y 4" de diámetro, en él se muestra para el eje Y.

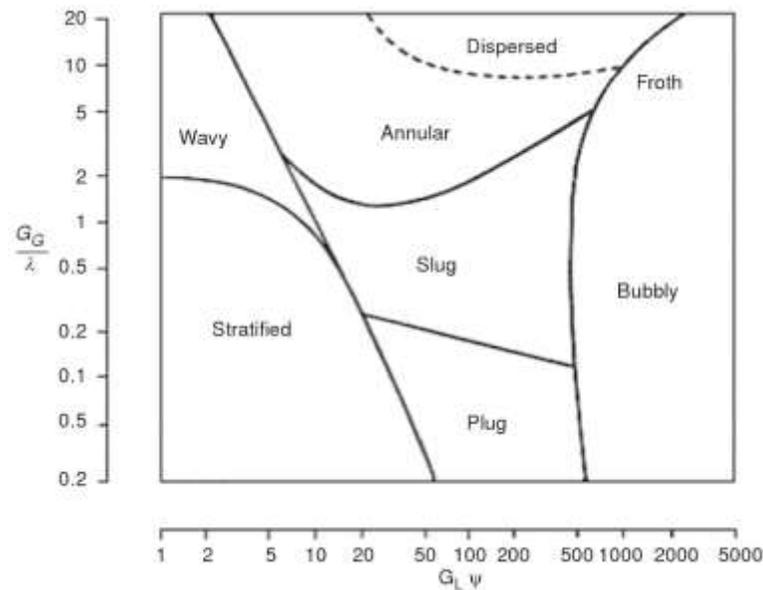


Figura 12 Mapa de patrones de flujo horizontal de Baker, 1954.
Fuente: Mapa de Baker (3)

2.3.3. Mapa de regímenes de Dukler

El mapa de flujo elaborado por Dukler (1954) y fue modelado por Taitel (1976) es considerado el mapa de patrones de flujo horizontal con dos fases mayormente utilizado, debido a que se basa en un método semi-teórico y es computacionalmente difícil de usar que otros mapas de flujo. En la Figura 13 mapa de patrones de flujo horizontal, la coordenada horizontal del mapa de Taitel y Dukler, representa el parámetro de Lockhart-Martinelli, de su modelo en 1949. Las coordenadas verticales del mapa de Taitel y Dukler se indican mediante la variable K en el lado izquierdo y T o F en el lado derecho.

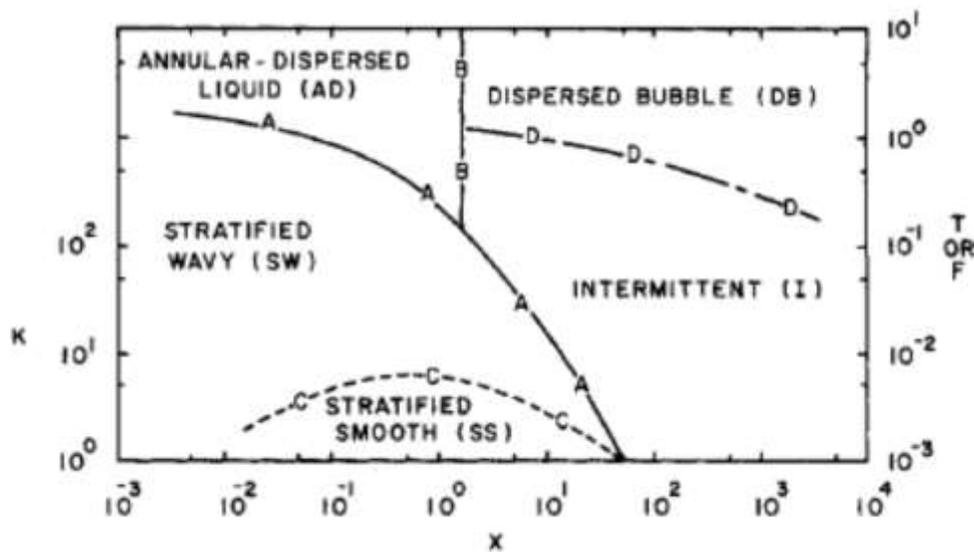


Figura 13 Mapa de patrones de flujo horizontal de Dukler
Fuente: Mapa de Dukler (3)

Donde el eje x es representado por el modelo de Lockhart-Martinelli:

$$X = \left[\frac{|(dP/dx)_{L^s}|}{|(dP/dx)_{G^s}|} \right]^{1/2}$$

Donde:

- X Número de Lockhart-Martinelli
 $(dP/dx)_{L^s}$ Gradiente de presión de la fase líquida
 $(dP/dx)_{G^s}$ Gradiente de presión de la fase gaseosa

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \frac{u_{G^s}}{\sqrt{D_g \cos \alpha}}}$$

Ecuación 5

$$K = F \left[\frac{D u_{L^s}}{v_L} \right]^{1/2} = F [Re_{L^s}]^{1/2}$$

Ecuación 6

Donde:

- F Número de Froude Adimensional
 u_{G^s} Velocidad media superficial del gas
 D Difusividad hidráulica del canal
 Re_{L^s} Número de Reynolds medio en la fase líquida

El parámetro Lockhart – Martinelli depende de los parámetros CL, CG, n y m. Los autores toman los valores de estos parámetros que corresponden a gas turbulento y flujo de líquido turbulento, que es el caso de mayor interés práctico ($n = m = 0.2$, $CG = CL = 0.046$).

2.3.4. Mapa de regímenes de Eaton (1949)

Eaton y colaboradores realizaron estudios de campo para tuberías de 2, 4 y 17 pulgadas de diámetro a diferentes condiciones y obtuvieron una correlación que permite determinar las pérdidas de energía para flujo en tuberías horizontales. En la correlación, presentaron por separado una correlación para determinar el factor de fricción y una correlación para determinar el factor Hold up Figura 14, consideran las fases que fluyen cómo una mezcla homogénea, de propiedades promedio, es decir, evita la dificultad de hallar

los regímenes de flujo. Este método predice una mayor caída de presión que la que realmente ocurre, lo cual provee un factor de seguridad en los cálculos. Para la derivación final de la ecuación ellos parten de la ecuación general de la energía en forma diferencial:

Para la derivación final de la ecuación ellos parten de la ecuación general de la energía:

$$E_{alm} = E_{ent} + E_g + E_{sal}$$

Ecuación 7

Donde:

| | |
|-----------|--------------------|
| E_{alm} | Energía almacenada |
| E_{ent} | Energía que entra |
| E_g | Energía generada |
| E_{sal} | Energía que sale |

Para tuberías horizontales si no se realiza ningún trabajo sobre el fluido, la ecuación de la siguiente forma:

$$E_{ent} - E_{sal} = 0$$

Ecuación 8

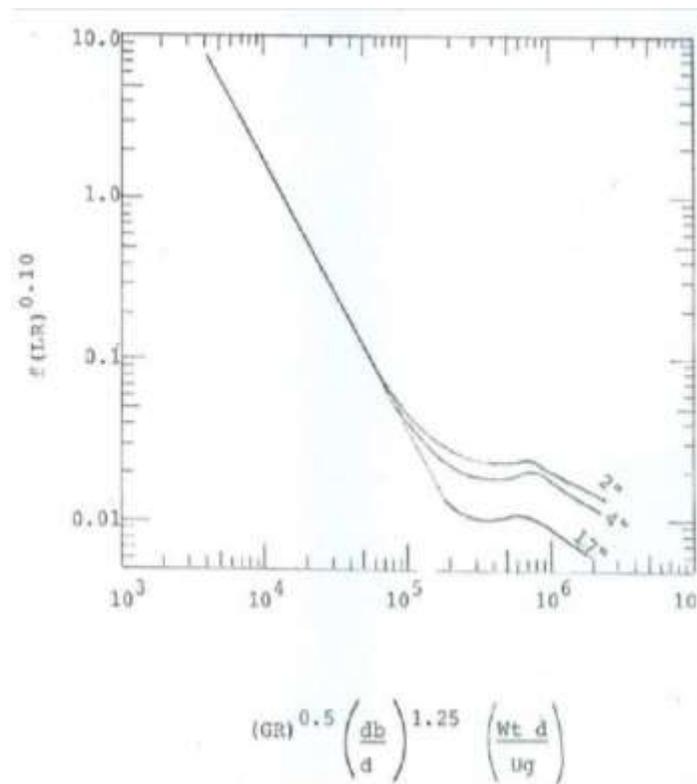


Figura 14 Factor de pérdida de energía.
Fuente: Fundamental of Multiphase flow (3)

2.4. DESAFÍOS EN LA MEDICIÓN DE FLUJO MULTIFÁSICO

Los fluidos multifásico actualmente presentan los siguientes desafíos (3):

- El desarrollo de los regímenes de flujo debido a las condiciones del proceso.
- La técnica aplicada para la medición de fases, y la incertidumbre de los dispositivos electrónicos.
- Las condiciones desfavorables donde el aceite y el agua se resisten a fluir en comparación con los gases que pueden perturbar los equipos.
- El aceite y el agua pueden formar emulsiones que dan altas pérdidas de presión y reducen la producción.
- La cera y los hidratos pueden precipitar y bloquear el tubo y afectar la medición.

- La química del agua promueve la corrosión de los instrumentos y la tubería.
- Es importante poder predecir los patrones de flujo y las condiciones de producción con la mayor precisión debido a que el alcance de los medidores está sesgado, y poder cubrir el mayor tiempo el desempeño del pozo hasta que llegue a la decadencia del yacimiento.

2.5. SIMULACIÓN CFD

La dinámica de fluidos computacional nace en 1970 y el desarrollo surge por la necesidad de modelar para la industria aeronáutica los fenómenos ya conocidos, pero en equipos de cómputo que aumentan el número de cálculos por segundo, en el transcurso de los años se mejoraron los procesos de diseño y la perfección de los algoritmos matemáticos del flujo de fluidos. El método se basa en discretizar el área de flujo tridimensional y solucionar por ecuaciones de Euler flujos no viscosos y ecuaciones de Navier-Stokes para flujos viscosos. El CFD hoy en día permite el uso de modelos de tercera dimensión, a través del procesamiento de una gran cantidad de datos y las visualizaciones gráficas proporcionan información con mayor detalle. (13)

2.5.1. Conservación de la masa y ecuaciones de continuidad

El principio físico fundamental que rige la materia es el de conservación de la masa y la energía, para ello las ecuaciones que las gobiernan tienen aplicación física por medio de modelos matemáticos de fluidos, la ecuación fundamental de continuidad de conservación de la masa y energía es el principio físico básico inicial. (14)

Sea la materia definida cómo un volumen está determinado en el espacio. La frontera que limita el volumen se llama la superficie de control, cómo se indica en la Figura 15, siendo la masa un fluido, se desplaza a través del volumen de control fijo, es decir, entra y sale a través de la superficie de control representado cómo flechas vectoriales, pero manteniendo el mismo espacio tridimensional.

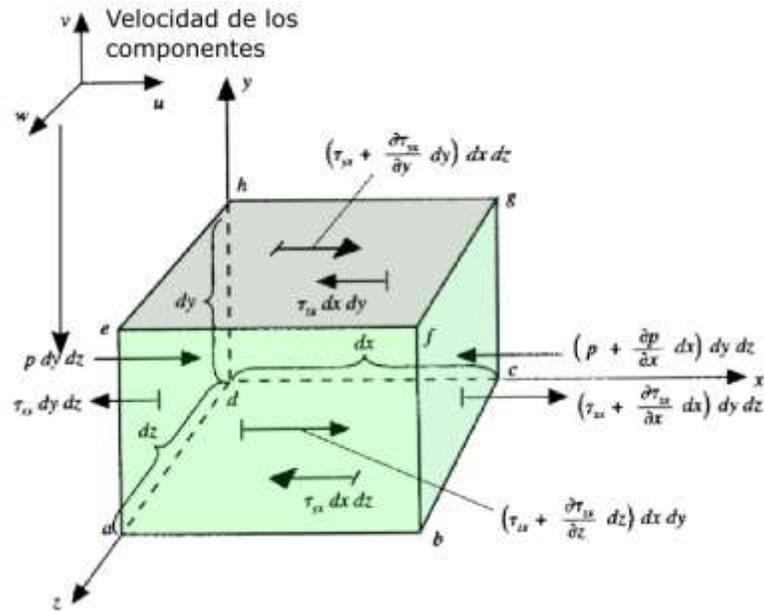


Figura 15 Ecuaciones de conservación de energía.
Fuente: Computational fluid dynamics (14)

La velocidad de cada flujo, el área de superficie representada en un vector de velocidad es dS . El volumen de control conserva un volumen finito, fundamentalmente la masa se conserva, pero el vector que se desplaza hacia el espacio vecino altera su estabilidad, y el proceso así mismo desencadena efectos transitorios derivados por el tiempo.

2.5.2. Teorema de Navier Stokes

Los fluidos mediante la ecuación de conservación fueron estudiados cómo un objeto sólido dimensional respecto a la variación del tiempo por Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes. Los resultados obtenidos se les conocen cómo ecuaciones de Navier Stokes, que a través de ecuaciones de derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos. (14)

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} +$$

Ecuación 9

Donde:

- $\rho \frac{D\vec{V}}{Dt}$ Derivada parcial de un volumen de control respecto al tiempo
- $\rho \vec{g}$ Derivada del vector gravitacional
- ∇p Variantes de la presión de un líquido incompresible
- $\mu \nabla^2 \vec{V}$ Para un fluido Newtoniano, viscosidad y velocidad como momento.

Esta ecuación se obtiene los principios de conservación de la masa y los principios de la termodinámica a un volumen de control. Haciendo esto se obtiene la llamada formulación integral de las ecuaciones. Para obtener sus diferenciales se aplican ciertas consideraciones, principalmente aquella en la que los esfuerzos tangenciales guardan una relación lineal con el gradiente de velocidad (ley de viscosidad de Newton), obteniendo de esta manera las diferenciales que generalmente son útiles para la resolución de problemas en la mecánica de fluidos.

Las ecuaciones de Navier-Stokes, por lo tanto, son ecuaciones en derivadas parciales no lineales. No se dispone de una solución general para este tipo de ecuaciones salvo a ciertos tipos de flujo y situaciones concretas. No es posible hallar una solución mediante métodos analítica y es preciso recurrir a los métodos numéricos para determinar una solución aproximada. La mecánica de fluidos utiliza métodos numéricos a través de la dinámica de fluidos computacional o CFD (de las siglas Computational Fluid Dynamics).

2.5.3. Teorema Euleriano y Lagrangiano

Los métodos matemáticos para fluidos no viscosos, debido a que las ecuaciones no contempla la variable de la viscosidad, la difusión de masa y la conductividad térmica son el modelo matemático establecido por Euler que utiliza derivadas parciales para descomponer el vector de

desplazamiento de la partículas en los tres ejes cartesianos en instantes de tiempo. (14) (13) es la base del enfoque Euleriano para el análisis de flujo.

El método de análisis Lagrangiano es alternativo al análisis Euleriano, en el cual se analiza una partícula moviendo a través de la región de flujo convertida en el vector de velocidad $V(t)$ moviéndose a lo largo de su propio camino particular.

Para el marco Lagrangiano, se establecen variables de referencia; x_0, y_0, z_0, t_0 y la atención se enfoca sobre un grupo de partículas del fluido para observar los cambios. Estos cambios se determinan para cualquier instante de tiempo, entonces se definen las posiciones: $(x-x_0), (y-y_0)$ y $(z-z_0)$. En este marco las variables independientes son: x_0, y_0, z_0, t_0 .

La relación entre estos dos marcos de referencia se establece al considerar cualquier cantidad a cómo función de x, y, z, t , desde el punto de vista Euleriano. Para el marco lagrangiano, existe un cambio $\delta\alpha$ para un tiempo δt que se expresa como: (Ecuación 10, Ecuación 11 y Ecuación 12)

$$\frac{\delta\alpha}{\delta t}\delta t + \frac{\delta\alpha}{\delta x}\delta x + \frac{\delta\alpha}{\delta y}\delta y + \frac{\delta\alpha}{\delta z}\delta z$$

Ecuación 10 Euler

teniéndose que:

$$\frac{\delta\alpha}{\delta t} = \frac{\delta\alpha}{\delta t} + \frac{\delta x}{\delta t} \frac{\delta\alpha}{\delta x} + \frac{\delta y}{\delta t} \frac{\delta\alpha}{\delta y} + \frac{\delta z}{\delta t} \frac{\delta\alpha}{\delta z}$$

Ecuación 11 LaGrange

Aplicando $\delta t \rightarrow 0$ se obtiene:

$$\frac{D\alpha}{Dt} = \frac{\delta\alpha}{\delta t} + u \frac{\delta\alpha}{\delta x} + v \frac{\delta\alpha}{\delta y} + w \frac{\delta\alpha}{\delta z}$$

Ecuación 12 LaGrange modificado

2.6. DELIMITANTES DE DISEÑO

Inestabilidad Kelvin-Helmholtz: Los regímenes de flujo horizontal pueden volverse inestables cuando se forman ondas en la interfaz entre las dos corrientes de fluido denominadas inestabilidades de Kelvin-Helmholtz (3). Debido a las densidades de los fluidos y las velocidades provocan una transición de uno a otro régimen de flujo, inicialmente de un flujo estratificado asciende a tapones o babosas. Por lo tanto, el límite del régimen de flujo es analizado el crecimiento de las ondas interfaces λ , observe la Figura 16.

La inestabilidad se origina por la interacción entre al menos dos de tres tipos de fuerzas: la flotación debida a la gravedad y proporcional a la diferencia en las densidades de los dos fluidos.

Esto se puede caracterizar por $g \lambda^3 \Delta \rho$ donde $\Delta \rho = \rho_1 + \rho_2$, g es la aceleración de gravedad y es una dimensión media de las olas, esto aplica en flujos horizontales, porque el fluido superior es el más ligero que el inferior, cuyo ocurre lo contrario, la fuerza de flotación es desestabilizadora y causa inestabilidad de Rayleigh-Taylor.

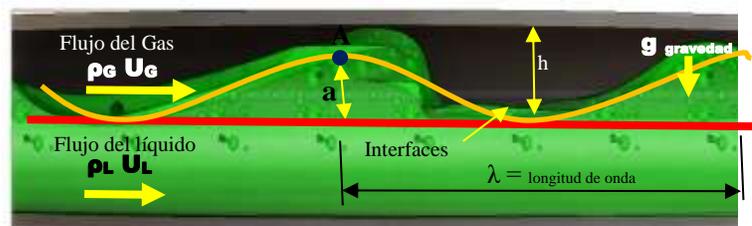


Figura 16 Esquema de inestabilidad de flujo.

Fuente: Elaboración propia de la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz (3)

2.6.1. Condiciones de frontera en los modelos cerrados

Después de discretizar un modelo, se requiere establecer las condiciones de frontera, que son las restricciones necesarias para la solución de un problema tenga límite, observe la Figura 17. Al resolver un problema de dominio se establece los valores iniciales y los valores finales.

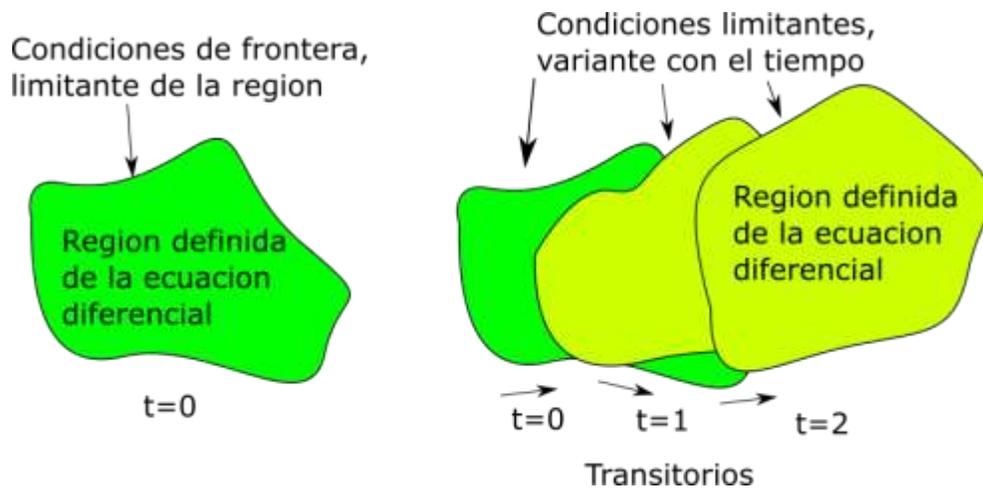


Figura 17 Condiciones de frontera que limita a los modelos matemáticos.
 Fuente: Elaboración propia del libro Computational fluid Dynamic (14)

Los modelos de CFD se a través de métodos numéricos integran una gran cantidad de datos, desde la mecánica física hasta la transferencia de calor, desde la mecánica de fluidos hasta la difusión acústica. Por lo tanto, los problemas se resuelven dentro de un espacio determinado, y condiciones establecidas cómo frontera.

Los problemas de valor inicial se refieren a problemas de frontera, pero con efectos sobre el tiempo, denominados transitorios, Figura 17. Estos modelos se han estudiado ampliamente estudiados por Jacques Charles François Sturm (1803-1855) y Joseph Liouville (1809-1882), quienes estudiaron los valores propios de una ecuación diferencial lineal de segundo orden.

2.6.2. Número de Reynolds

Dependiendo el valor de relativo de la fuerza, el resultado final es un movimiento con trayectorias definidas, identificado por Osborne Reynolds en 1883, clasificándolos en flujos laminar y flujos turbulentos (3).

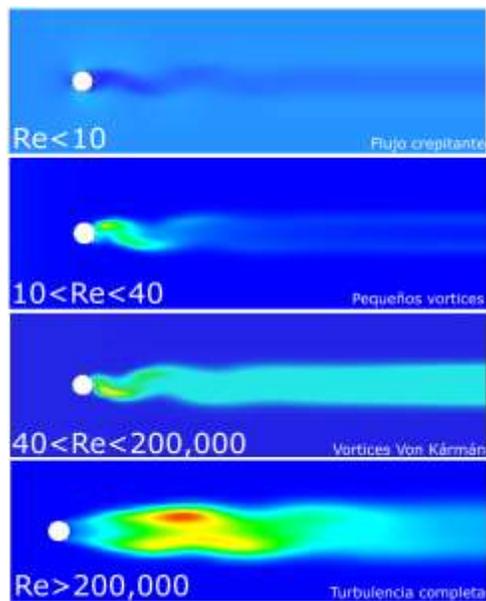


Figura 18 Número de Reynolds y forma del flujo.
Fuente: Elaboración propia.

El número de Reynolds (Re) es un valor adimensional que especifica las diferentes situaciones de flujo de fluidos. Un número de Reynolds de bajo valor establece que los flujos son flujo laminar, mientras que un número de Reynolds alto indica turbulencia. El número de Reynolds tiene amplias aplicaciones, que van desde el flujo de líquido en una tubería hasta el paso del aire sobre el ala de un avión. Se puede conocer la transición del flujo laminar a flujo turbulento de acuerdo con su escala, observe la Figura 18. Las predicciones del inicio de la turbulencia y la capacidad de calcular los efectos de escala se pueden utilizar para ayudar a predecir el comportamiento de los fluidos a mayor escala, cómo en el movimiento local o mundial del aire o el agua y los efectos meteorológicos y climatológicos asociados.

2.6.3. Flujo laminar y Flujo turbulento

Mientras un sistema esté en movimiento existen dos efectos principales que afectan su desplazamiento, la gradiente de velocidad y las fuerzas de fricción que produce una superficie a su fluidez (3). Cuyo sea mayor la resistencia de fricción, el flujo introduce movimientos rotatorios.

Figura 19.

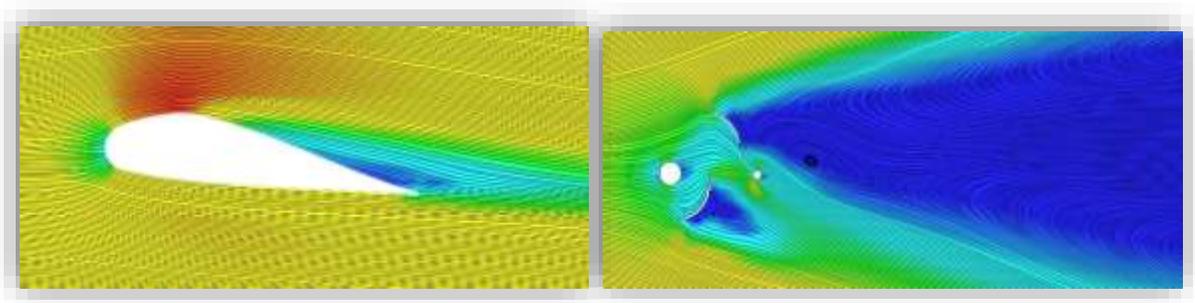


Figura 19 Flujo laminar (izquierda) y flujo turbulento(derecha).
Fuente: Elaboración propia.

Algunas veces al flujo laminar o simplificado presenta resistencia por viscosa al fluido, pero si la lámina se rompe en turbulencia, es difícil poder caracterizar el flujo del fluido.

Lo común de un flujo laminar es que, a través de una tubería, la velocidad del flujo varía desde las paredes del tubo hasta en centro, cómo un máximo V_M que se desplaza en la línea central del conducto. El perfil de flujo laminar se desarrolla dentro de un espacio confinado, y dicha geometría se observa en las Figura 20.

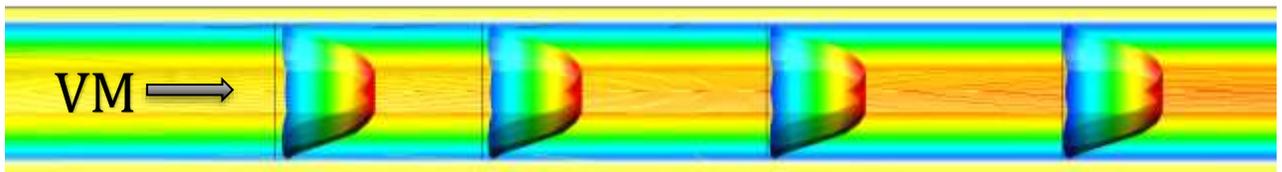


Figura 20 Perfil de flujo.
Fuente: Elaboración propia.

2.6.4. Perfil de velocidad de flujo

El perfil de velocidad de flujo de la Ley de Poisuille muestra que, bajo condiciones de viscosidad, la velocidad aumenta en dirección al centro del tubo, cómo función del radio en la Ecuación 13.

$$v(r) = \frac{\Delta P}{4\eta\Delta L}(R^2 - r^2) = V_m \left[1 - \frac{r^2}{R^2}\right]$$

Ecuación 13 Ley de Poisuille

El fluido transportado por cada lámina está dado por la Ecuación 14 (observe la Figura 21):

$$F = A \frac{v_m}{2}$$

Ecuación 14

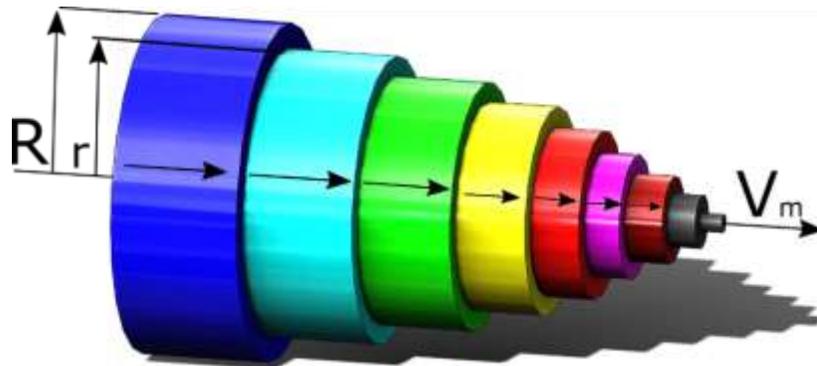


Figura 21 Perfil de flujo en función del radio.
Fuente: Elaboración propia.

Con el objeto de obtener la resistencia neta para que fluya un fluido laminar a través, se considera que las velocidades incrementan en dirección al centro del tubo en diferentes niveles de tubos concéntricos con resistencias diferentes. Figura 22.

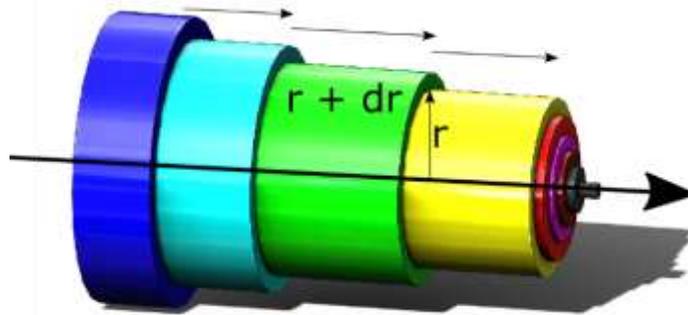


Figura 22 Perfil de flujo en función del radio y longitud.
Fuente: Elaboración propia.

El flujo volumétrico se puede expresar generalmente por la Ecuación 15:

$$F = Av_{efectiva}$$

Ecuación 15

Pero la velocidad efectiva no es un simple promedio como consecuencia del perfil de velocidad no lineal.

2.7. MÉTODO DE BEGGS & BRILL

La correlación Beggs y Brill fue creada en 1973 por Brill, J.P. y Beggs, D.H con base a 584 pruebas experimentales de flujo a lo largo de un sistema de tubería acrílica de 1 pulgada y 1.5 pulgadas de diámetro, con 90 pies de largo, así mismo un mecanismo que permitía inclinar el sistema. Ver Figura 23, (15)

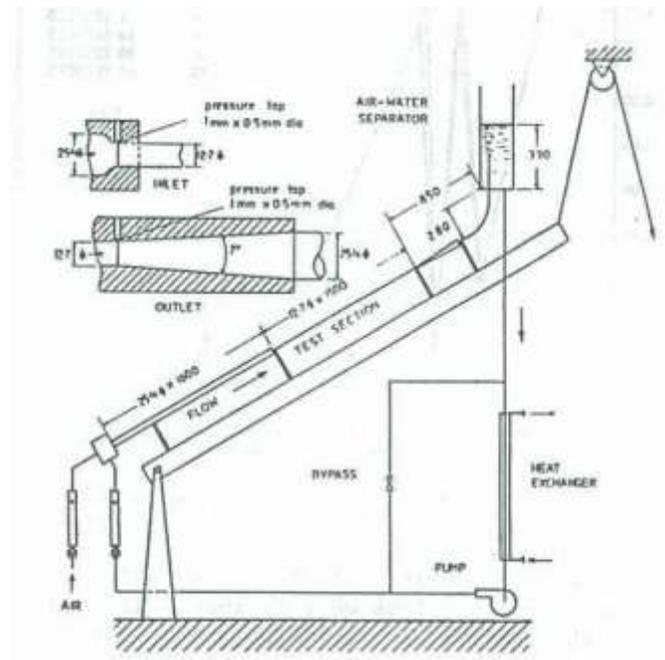


Figura 23 Modelo experimental de Beggs & Brill 1973.
Fuente: Publicación científica de Beggs & Brill 1973

Las características del sistema experimental es que se desarrolló con una mezcla multifásico de agua y aire a pequeña escala. Se variaba el gradiente de elevación para obtener cómo los regímenes de flujo y cómo se afecta por el colgamiento (o hold-up) y la caída de presión.

- Gasto de gas, 0 a 300 Mpies³/día.
- Gasto de líquido, 0 a 30 gal/min (0 a 1.635 x 10⁶litros/día).
- Presión promedio del sistema, 35 a 95 psia.
- Diámetro de la tubería, 1 y 1.5 pulgadas.
- Colgamiento de líquido, 0 a 0.870.
- Gradiente de presión, 0 a 0.8 psi/pie.
- Ángulo de inclinación, -90° a +90°.
- Patrón de flujo horizontal.

2.7.1. Método de Beggs y Brill

El método Beggs y Brill utiliza el balance general de energía mecánica en flujo en los diferentes regímenes de flujo con su promedio para calcular el gradiente de presión. La correlación de Beggs y Brill (1973) es capaz de

manejar correlaciones de flujo entre el petróleo y el gas, flujo ascendente, descendente, horizontal, inclinado y vertical para fluidos de dos fases.

Básicamente la ecuación que determina la caída de presión de un sistema multifásico es semejante al de una sola fase, (15) donde el gradiente de presión total se describe por la siguiente ecuación:

$$\frac{dP}{dZ} = [(\frac{dP}{dZ})_{Fric.} + (\frac{dP}{dZ})_{Ele.}] / (1 - Ek)$$

Ecuación 16

$(\frac{dP}{dZ})_{Fric.}$ Es el gradiente de presión por fricción.

$(\frac{dP}{dZ})_{Ele.}$ Es la diferencia de presión hidrostática

Ek Estima la pérdida de presión debido a la aceleración.

2.7.2. Mapa de patrón de flujo Beggs y Brill

Con el número de Froude (N_{FR}) se determina el régimen de flujo y el contenido de líquido de entrada C_L . El parámetro para el cálculo de Froude es mediante la Ecuación 17.

$$N_{FR} = \frac{v_m^2}{gD}$$

Ecuación 17

Donde, v_m es la velocidad de la mezcla, D es el diámetro interior de la tubería y g es la constante gravitacional, Ecuación 18.

$$C_L = Q_L / (Q_L + Q_G)$$

Ecuación 18

Donde, Q_L es flujo volumétrico líquido y Q_G es flujo volumétrico de gas.

Las líneas de transición definidas en las Ecuación 19 para la correlación se definen con las siguientes ecuaciones representadas en la Figura 24.

$$L_1 = 316 C_L^{0.302}$$

$$L_2 = 0.0009252 C_L^{-2.4684}$$

$$L_3 = 0.1 C_L^{-1.4516}$$

$$L_2 = 0.5 C_L^{-6.738}$$

Flujo estratificado

$$C_L < 0.01 \text{ y } N_{FR} < L_1$$

$$C_L \geq 0.01 \text{ y } N_{FR} < L_2$$

Flujo de Baches

$$0.01 \leq C_L < 0.4 \text{ y } L_3 < N_{FR} \leq L_1$$

$$C_L \geq 0.4 \text{ y } L_3 < N_{FR} \leq L_4$$

Flujo Burbujas

$$C_L < 0.4 \text{ y } N_{FR} \leq L_4$$

$$C_L \geq 0.4 \text{ y } L_3 < N_{FR} > L_4$$

Flujo Disperso

$$L_2 < N_{FR} \leq L_3$$

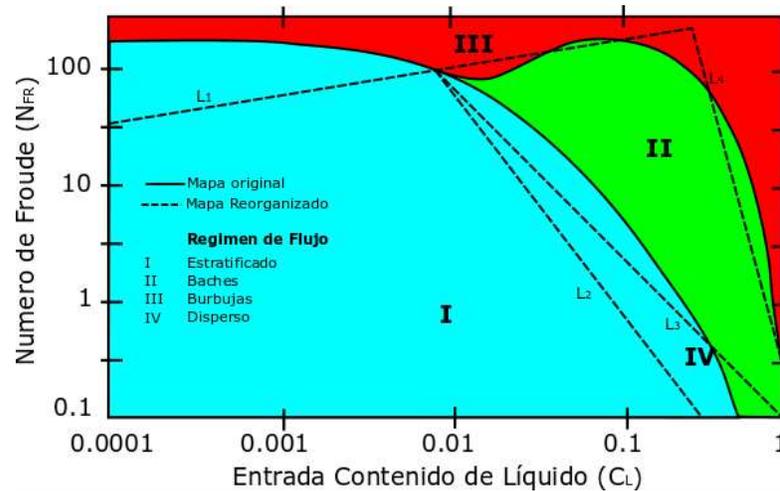


Figura 24 Mapa de regímenes de Flujo Beggs y Brill.
Fuente: Elaboración propia del modelo de Beggs y Brill

2.7.3. Número de Froude

El número de Froude (Fr), es un valor adimensional que describe la relación entre la fuerza inercial y la fuerza de gravedad dentro de los diferentes regímenes de flujo en un canal. La Ecuación 20 de Froude permite establecer un criterio de estabilidad del fluido el cual se describe como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Siendo:

V = Velocidad del agua

D = Profundidad hidráulica (sección transversal del flujo)

g = Gravedad

De acuerdo el valor del número de Froude se puede clasificar.

$Fr = 1$ Flujo Crítico

$Fr > 1$ Flujo Supercrítico (Flujo rápido)

$Fr < 1$ Flujo Subcrítico (Flujo lento y en calma)

El número de Froude permite conocer la forma de fluido, tales como olas, interacciones de los fluidos, para valores de $Fr < 1$ es propio de olas pequeñas en la superficie y velocidad baja; en flujos críticos $Fr = 1$, la velocidad de flujo es igual a la fuerza originada por la gravedad; en los flujos $Fr > 1$, prevalecen las perturbaciones y remolinos dentro del fluido.

2.8. GRUPOS DE FLUJO EN EL MAPA DE BEGGS & BRILL

Durante la extracción del petróleo, la tubería debajo de la superficie inicia con flujo vertical y direccional, que se conecta en la superficie (al cabezal del pozo) de la plataforma. Una vez que el fluido llega a la superficie, las direcciones de flujo están frecuentemente involucradas en dirección de flujo horizontal e inclinado. El uso del tipo de dirección de flujo está estrechamente relacionado al valor de los cambios en la presión a lo largo del flujo de la tubería.

Un fluido multifásico que viaja a lo largo de la tubería tiende a generar las formas diferentes de patrones de flujo; la dirección del flujo del fluido se puede dividir en cuatro categorías, a saber: flujo vertical, flujo horizontal, flujo inclinado y flujo direccional. La dirección del flujo inclinado y direccional hace que el ángulo de inclinación oscile entre 0 y 90 grados con respecto al eje horizontal. Los patrones de flujo multifásico, de acuerdo con Beggs and Brill se agrupan en tres categorías, a continuación, se muestran cada clasificación.

2.8.1. Flujos multifásico segregados

Los flujos segregados se caracterizan por que las fases se encuentran en su mayor parte separadas y se destacan tres regímenes: flujo estratificado, flujo ondular y flujo anular. El primero se caracteriza porque el líquido va fluyendo por la parte baja de la tubería, mientras el gas fluye en la parte superior.

Estos flujos ocurren las fases tienen una tasa relativamente baja y cuanto más aumenta comienza a ondularse, originándose el flujo ondular y, por último, el flujo anular cómo se muestran en la Figura 25.

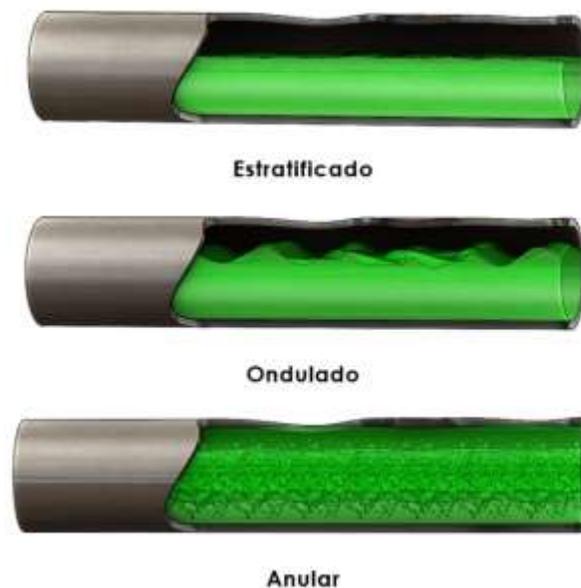


Figura 25 Regímenes segregados.
Fuente: Elaboración propia.

2.8.2. Flujos multifásicos intermitentes

El grupo de flujos intermitente son aquellos en el cual el gas y el líquido fluyen alternadamente a través de la tubería, se divide en dos regímenes de flujo: flujo bache y flujo tapón. El flujo bache consiste en grandes baches de líquido alternado con burbujas de gas a alta velocidad llenando la mayor parte de

la tubería. El flujo tapón se distingue por el flujo de grandes burbujas de gas a lo largo de toda la tubería y se muestran en la Figura 26.

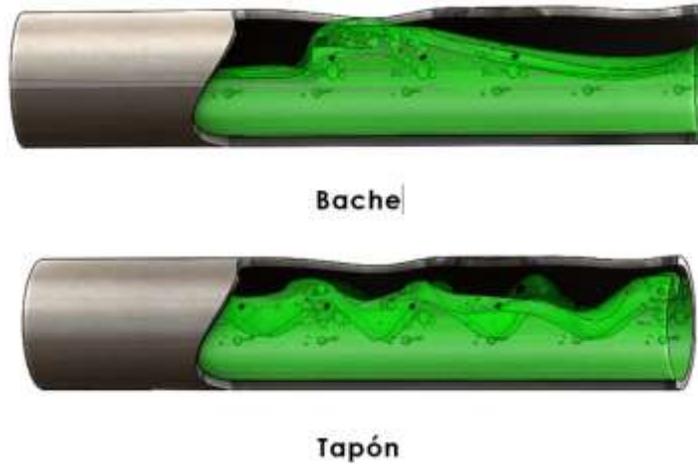


Figura 26 Regímenes intermitentes.
Fuente: Elaboración propia.

2.8.3. Flujos multifásico distribuido

Este flujo se caracteriza por una fase que se encuentra dispersa en la otra y se distinguen dos tipos: el flujo tipo burbuja y flujo tipo niebla o disperso. El flujo tipo burbuja: arrastra pequeñas burbujas en la fase líquida, el gas se encuentra disperso en toda la tubería. Este tipo de patrón aparece a altos caudales de líquido, en donde las fuerzas turbulentas impiden la coalescencia de las burbujas para conformar paquetes grandes de gas.

El flujo tipo niebla se presenta a altas tasas de gas y bajas tasas de líquido y consiste en gas con gotas dispersas de líquido. este régimen de flujo es considerado semejante al flujo. Estos regímenes se muestran en la Figura 27



Burbujas



Niebla

Figura 27 Mapa de regímenes distribuido.
Fuente: Elaboración propia.

2.9. SOFTWARE DE MODELADO CFD

Existen una diversidad de compañías desarrolladoras de software, que con el incursionamiento del diseño 3d, se han incorporado herramientas virtuales de simulación. De acuerdo con la encuesta de www.resolvedanalytics.com, realizada en 2016 sobre los principales softwares usados de CFD, Figura 28:

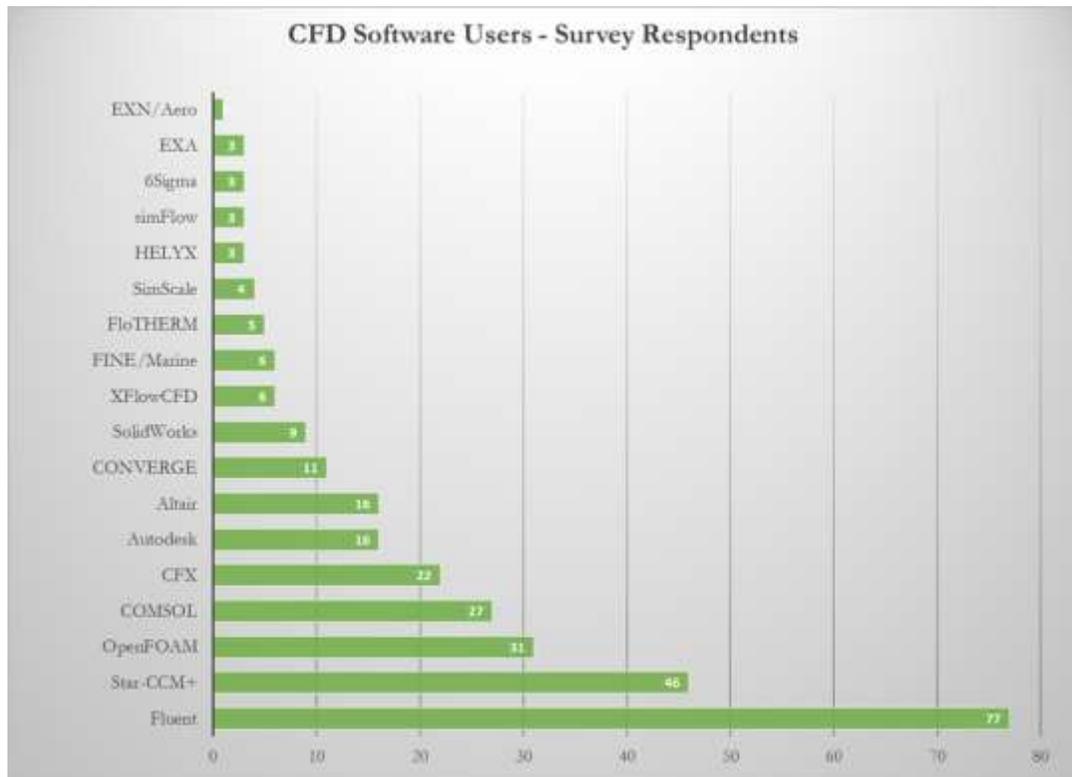


Figura 28 Uso de software de simulación CFD.
Fuente: www.resolvedanalytics.com

El software especializado más popular es el Fluent Ansys, y por las características y opiniones de los usuarios brinda resultados confiables debido a su gran manejo de variables de entorno.

El Open FOAM, ha obtenido gran popularidad debido a que es software de código abierto y brinda posibilidad de que las limitantes es su bajo soporte para usuarios.

Los softwares integrados como el de SolidWorks y Autodesk, son paquetes de CFD que se incorporan como asistencia para el diseñador que busca resolver problemas de flujo no reactivo de estado estable, y así interrelacionar la funcionalidad del diseño en el desarrollo de un producto.

Existen muchos softwares de diseño especializado por ejemplo CONVERGE dirigida para diseño de motores de combustión, AVL Fire para desarrollo de

motores de aviones, otras marcas cómo FloTHERM orientada a la industria eléctrica, FINE /Marine para aplicaciones de flujo de marítima, entre otros.

Todos los softwares son ampliamente aceptables si es aprovechan al máximo sus capacidades, y el adecuado intrínsecamente está vinculado al costo y los recursos que requiere para aprovecharlo.

2.9.1. La simulación CFD

Los softwares de diseño tienen diversas características, por lo cual es complicado comparar su eficacia, hay un proceso en común para llegar a obtener un resultado que puede ser mejor en uno u otro para diversos casos.

- **Etapa de diseño geométrico:** Para definir las condiciones de frontera, se requiere de una geometría que límite la dinámica de fluido en el análisis, puede ser paramétrico o no (con propiedades del material), bidimensional o tridimensional.
- **Etapa de Mallado:** Etapa en cual se discretizar un modelo virtual, existen diversos métodos y geometrías específicas para interrelacionar los modelos numéricos en la búsqueda de la solución finita. Depende del software del refinamiento en la malla en las zonas de interés.
- **Condiciones de frontera:** Se deben establecer los parámetros de borde que permiten al sistema iniciar la dinámica de fluido, es decir, las entradas y las salidas.
- **Procesamiento y ciclo de cálculo:** En esta etapa se realiza el cálculo reiterativo del modelo y normalmente es la sección tardada en cuestión de tiempo por el número de cálculos ejecutados por el procesador. Es posible determinar modelos de cálculos finitos específicos para realizar el procesamiento.

- **Resultados:** Es la presentación de los resultados de modo puntual, gráficamente sea bidimensional o tridimensional, o en función de tiempo, sea el caso requerido.

Es posible que entre cada etapa se añadan o presenten variables de influencia con el entorno, por ejemplo: gradiente de temperatura, gradiente de turbulencias, la fricción de superficies, entalpía, etc.

2.10. LABORATORIO DE FLUJO MULTIFÁSICO

La principal actividad del laboratorio es la investigación relacionada con el control de flujo para la industria del petróleo, contribuyendo significativamente al desarrollo de simuladores de flujo multifásico, desarrollo de tecnología de flujo de agua y de transporte de arena, desarrolló en producción submarina de petróleo y gas en ambientes fríos y a lo largo de largas distancias de transporte (16).

Son instalaciones con complejos sistemas de tubería y configuraciones, equipos para el control y manejo de flujo, presiones y temperaturas que se observan en la industrial real, instrumentación y equipamiento para permitir estudios de todos principales fenómenos reales bajo condiciones controladas.

2.10.1. Circuito de flujo o Flow Loop

Un elemento importante del laboratorio es el circuito o lazo de flujo, utilizado para investigar las características del flujo de fluido dentro de la tubería y conocer la respuesta de los instrumentos de registro a este flujo. Los fluidos circulan continuamente en un bucle, paso por una sección de medición principal que puede colocarse en diferentes desviaciones de vertical a horizontal. Las propiedades de fluidos, la presión y las velocidades pueden variarse. Los bucles de flujo son esenciales para el estudio del flujo multifásico y el desarrollo de nuevas medidas de registro de producción. Observe el circuito de SINTEF de la Figura 29.



Figura 29 Circuito de largo flujo en el laboratorio de SINTEF de Noruega.
Fuente: www.sintef.no

2.10.2. Circuitos de flujo estudiantil

Los circuitos de flujo en son usualmente manejados por universidades para la investigación de flujo multifásico con fines demostrativos generalmente, y con búsqueda de desarrollo e investigación por sus ares académicas. Van desde horizontal a vertical, cómo inclinados, con flujo tanto de arriba cómo hacia abajo. Operada con agua generalmente y en ciertas veces con aceite cómo fases líquidas y el uso de aire o el hexafluoruro de azufre cómo fase gaseosa (17).

El diseño y el rendimiento de los sistemas permiten que sea una herramienta valiosa para estudios de fenómenos de flujo que se producen en condiciones de flujo de pozo típicas, así como en tuberías de transporte. La presión el líquido es bajo, por consideraciones de seguridad y capacidad del sistema. Observe la fotografía del sistema de circuito de flujo del Institute for Energy Technology en Noruega, Figura 30.



Figura 30 Circuito de flujo del Institute for Energy Technology en Noruega.
Fuente: [//ife.no/en/](http://ife.no/en/)

2.11. LABORATORIOS DE MEDICIÓN DE FLUJOS EN MÉXICO Y EL MUNDO

Se presenta los laboratorios experimentales de medición que existen en México dedicados a la investigación y transferencia de tecnología, sus principales desarrollos y en que se centran sus trabajos principalmente. Así mismo se presentan los centros importantes del planeta.

2.11.1. Instituto Mexicano del Petróleo

El laboratorio en el Parque Industrial La Reforma, en Pachuca, Hidalgo (18) tiene la capacidad para llevar a cabo la evaluación de soluciones enfocadas a los sistemas de control, sistemas electrónicos y sistemas computacionales para la automatización de los procesos de la industria petrolera, Figura 31.

Evaluación de soluciones enfocadas a la mecánica de fluidos, especialmente para el comportamiento de elementos y sistemas de medición, detección de fugas o tomas clandestinas y fenómenos de transporte en ductos verticales.

Atención a los proyectos enfocados al desarrollo de tecnología que requieren observar y medir experimentalmente el comportamiento de sus soluciones, para el mejoramiento de flujo y fenómenos que ocurren durante la producción de hidrocarburos, tanto en el pozo como en las instalaciones superficiales.

Asimismo, se atiende a los proyectos que buscan verificar el funcionamiento de tecnologías de medición de flujo, instrumentación, monitoreo y control, tanto las existentes como las de prototipos y los que requieren la evaluación de su desempeño y aplicaciones específicas para los distintos procesos de producción de la industria petrolera. También se da servicio a los proyectos que necesitan soporte en la implementación de tecnologías para automatizar la operación y el registro de información y eventos, para llevar a cabo la experimentación científica.

Un sistema de lazo multifásico, una unidad de compresión, un separador trifásico, bombas y medidores de flujo, presión y temperatura, hasta 3 500 bpd en aceite; 2 500 bpd de agua; 2.1 mmpcsd en gas todos hasta 14 kg/cm².



Figura 31 Laboratorio de Medición Multifásico del Instituto Mexicano del Petróleo en Pachuca Hidalgo.

Fuente: www.gob.mx/imp/articulos

2.11.2. Nel Flow Measurement Services

Originalmente, el Laboratorio Nacional de Ingeniería (NEL) (19) ubicado en East Kilbride, GLASGOW, G75 0QF Reino Unido, es uno de los grandes laboratorios de investigación pública financiados por el gobierno en el Reino Unido, con personal de científicos e ingenieros del Servicio Civil Científico, son conocidos por la medición de caudal y es reconocida internacionalmente cómo una de las principales autoridades en la medición de caudal, después de más de 60 años de investigación y desarrollo. También es el Instituto Nacional de Medición responsable de la gestión de la Norma Nacional del Reino Unido para Medición de Flujo, Figura 32.

Su laboratorio es actualmente uno de los más grandes del mundo y reproducen pruebas en materia de flujo multifásico, de una fase, sea gas, aceites, y agua. Realizan certificaciones, calibraciones y desarrollo de nuevas tecnologías.



Figura 32 Laboratorio de NEL Flow Measurement services en Reino Unido
Fuente: www.tuv-sud.co.uk

2.11.3. Fluid Control Research Institute

El Instituto ubicado en Kanjikode West, palakkad - 678623, (20) Kerala, India, se dedica al estudio del flujo multifásico La característica única sobre el último

sistema de medidor de flujo desarrollado para medición es transitorias es su esquema de rayos gamma de rayos múltiples colimado que permite la tomografía / visualización en línea no intrusiva. El sistema también tiene alta respuesta rápida de 2-5ms que permite que sea utilizado para los flujos transitorios del gas-líquido tales como flujos de la rotura del vapor-agua en sistemas del intercambiador de calor de plantas de energía. El sistema ha sido diseñado para manejar altas velocidades de flujo en condiciones extremas hasta 340°C de temperatura y 125 bar de presión, Figura 33.



Figura 33 Laboratorio de Medición Multifásico del Instituto de control del Fluidos en India.

Fuente: www.fcridia.com.

2.11.4. The Michelsen Center

El laboratorio instalado en Christian Michelsen Research, (21) Fantoftvegen 38, Bergen (NORUEGA) tiene la capacidad para desarrollo de pruebas en múltiples condiciones de flujo gas líquido y aceite, este instituto es dedicado a impartir cursos y capacitaciones de esta materia en el mercadoFigura 34. Figura 34

El curso se basa en el manual de NFOGM en la medición multifásico. NFOGM es una sociedad independiente para el personal dedicado a la medición de petróleo y gas.



Figura 34 Laboratorio The Michelsen Center, en Noruega.
Fuente: www.michelsencentre.com/

2.11.5. Process Laboratories Netherly. (PROLAB NL) B.V.

ProlabNL, situada en Arnhem-Países Bajos Provincia de Güeldres, (22) es una instalación de prueba independiente para equipos de proceso de petróleo y gas. ProlabNL ofrece instalaciones de prueba a gran escala que operan con hidrocarburos vivos reales (gas natural y petróleo crudo) a altas presiones que simulan condiciones reales de campos petrolíferos. Sus bucles de flujos se han utilizado ampliamente para programas de calificación de tecnología submarina de las principales compañías de petróleo y gas, Figura 35.

ProlabNL ha crecido rápidamente en el mercado al ofrecer uno de los flujos de flujo multifásico eficaces disponibles en todo el mundo. Todos los bucles de flujos son operados por operadores expertos e ingenieros de pruebas apoyados por expertos en procesos para asegurar que nuestros clientes

puedan llevar a cabo sus programas de calificación en las condiciones realistas del campo petrolero en el menor tiempo posible.

ProlabNL está certificado por la ISO 9001: 2008 Normas internacionales de calidad para pruebas de equipos de proceso para las industrias de petróleo y gas y petroquímica a baja presión y condiciones realistas de alta presión.



Figura 35 Laboratorio de Medición Multifásico PROLAB NL.
Fuente: www.prolabnl.com

3. CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

La característica de un producto original es su capacidad de inventiva, la manera poco común de resolver una necesidad, aumentando la satisfacción del usuario, su ergonomía, su estética, su productividad, así como su plusvalía hacia los usuarios. El simulador de flujo multifásico sigue las fases de desarrollo de productos en la manufactura, y representa el proceso en la Figura 36 (23).

- Definición Estratégica
 - Definición de objetivos
 - Definir el problema
 - Documentación
 - Analizar fuentes de información
 - Definir las áreas de mayor peso para el desarrollo del producto
 - Investigar la propiedad intelectual
- Diseño Conceptual
 - Propuestas básicas
- Validación funcional CDF
 - Pruebas y ensayos del modelo
 - Establecer sus límites de operación
 - Regresar al ajuste del diseño
- Diseño de detalles
 - Definición de costos y materiales
 - Planos de detalle de construcción



Figura 36 Fases del procedimiento de investigación.
Fuente: Elaboración propia.

El método de investigación y desarrollo se fundamenta en la comparación y validación del desarrollo virtual, a través de un mapa de regímenes de flujo multifásico ya establecido, (Beggs and Brill).

Mediante el CDF es posible recrear el flujo del fluido (agua y aire) de manera controlada, y virtualmente obtener el patrón de flujo que se espera corresponda o aproxime a lo dicho por el mapa de Beggs and Brill.

La propuesta temática será sometida a un muestreo mapeado de velocidades de gas y aire, para determinar los límites de operación en el cual puede desarrollarse el régimen esperado.

Después que la simulación de flujo por CFD muestre los resultados, se modela el dispositivo en 3D.

El dispositivo simulador de flujo multifásico será diseñado con virtualmente con componentes reales, con dimensiones reales, y satisfaciendo las

características de un modelo real. Se investigarán los costos de materiales y refinarán los planos de construcción.

3.1. DEFINICIÓN ESTRATÉGICA

Esta primera etapa consiste en determinar los objetivos, delimitación del alcance y el planteamiento del problema.

El desarrollo de la propuesta impone un cambio tecnológico, y sus resultados permiten obtener datos medibles y comprobables a los regímenes de flujo ya documentados.

La propuesta de diseño permite definir la viabilidad económica, ya que es uno de los alcances de los objetivos de la tesis, durante el proceso de manufactura el aspecto económico, es importante, lo cual te permite conocer cómo están posicionados los competidores.

Este desarrollo de este dispositivo permite cambiar socialmente en nuestro país, a los estudiantes cómo investigadores les ofrecerá nuevas ideas tecnológicas, e incrementar el intercambio de tecnológico en materia de medición de flujo multifásico.

3.1.1. Definición de objetivos

En la definición específica del nombre de este trabajo, se define el objetivo general, bajo en cual partirán los objetivos secundarios.

Desarrollar un sistema factible, que reciba aprobación para su diseño y desarrollo, con beneficios hacia la sociedad o la región donde está orientada.

3.1.2. Documentación

Analizar y consultar diferentes fuentes de información, conocer los temas que involucran al desarrollo de la propuesta, hacer uso de los recursos

documentados. Además, realizar un compendio de información sean publicaciones, artículos y material bibliográficos, bajo el cual él pueda sustentar las partes del comprender al diseño de la propuesta.

Investigar modelos existentes en la propiedad intelectual, conocer los desarrollos semejantes y los resultados obtenidos. Sin incurrir el plagio y proponer mejoras si es existente el equipo deseado.

Durante el proceso de documentación, se busca reforzar aquellos conocimientos que resultan limitados en el desarrollo de la propuesta, y considerar no abundar demasiado en temas en los cuales tenemos aptitudes.

3.1.3. Plan Estratégico

Es importante administrar el recurso del tiempo, realizar una programación de actividades y de disponibilidades, y todo lo que el diseño consume, cómo uso de dibujo, tiempo de investigación, de simulación, interpretación de los resultados, y documentación.

Además, considerar el uso de herramientas como: software, bases de datos de documentos científicos, acceso a bibliografías, equipo de cómputo y lo necesario para que el plan estratégico finalice.

3.2. DISEÑO CONCEPTUAL

La fase inicia con conceptualizar la idea principal, plasmar el objetivo general, en la Figura 37 se observa cómo inicia la propuesta de diseño, dentro del esquema general de la manufactura.

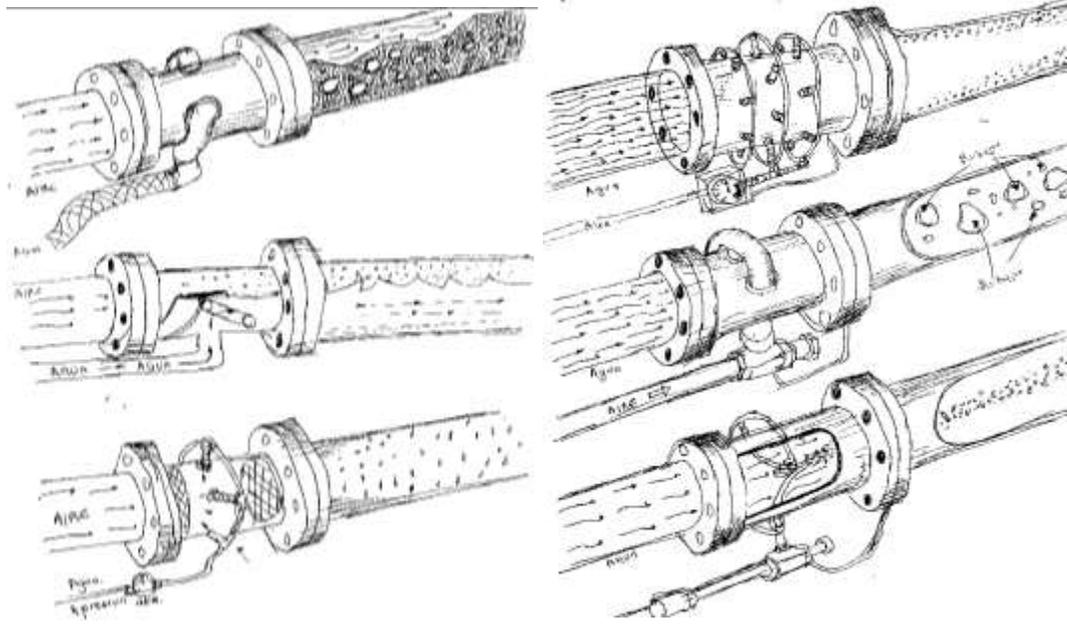


Figura 37 Propuesta inicial del diseño del simulador de flujos multifásico.
Fuente: Elaboración propia.

La presentación del diseño preliminar genera un avance en la conceptualización de los elementos y partes básicas que se requieren, y con ello los aspectos que se necesitan definir específicamente para el trabajo de diseño de detalle.

Los aspectos específicos que se establecieron son:

Las funciones para realizar de cada uno de los carretes mezcladores, los mezcladores de régimen de flujo vertical y horizontal.

Los costos bajo la cual las partes se tomarán en el diseño, y que satisfagan los alcances establecidos en la sección documental, es importante señalar que el diseño es con parte virtualmente reales a escala real. Observe la Figura 38.

objetivos específicos discutidos en la etapa de diseño básico. En la Figura 39 se aprecia el trabajo de diseño a detalle.

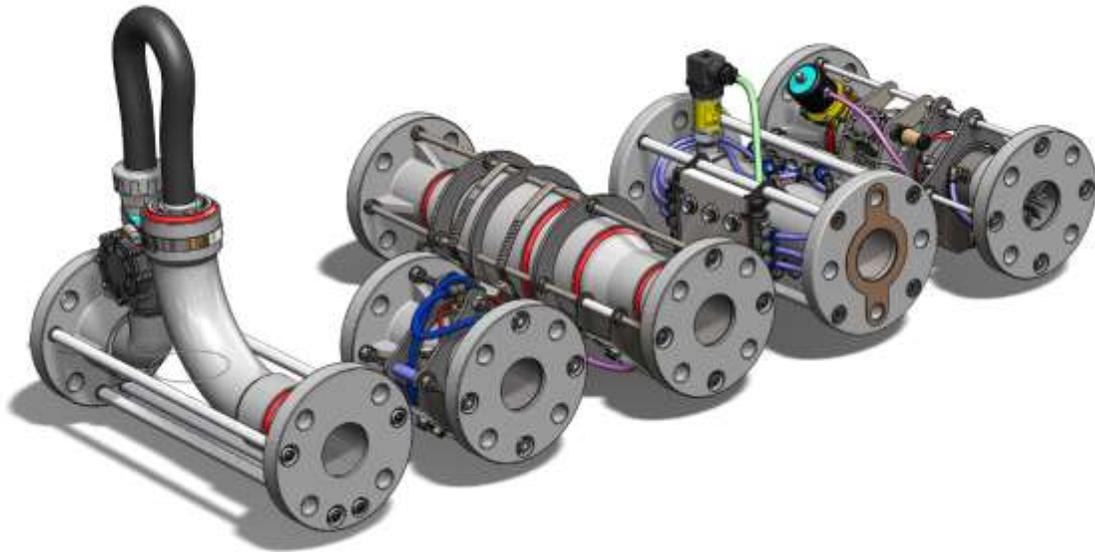


Figura 39 Diseño de detalle en la propuesta.
Fuente: Elaboración propia.

En la etapa de diseño destacan las habilidades mecánicas, es decir:

- Evitar partes en colisión o entrecruzadas, que normalmente el diseño las permite, pero la realidad no es posible.
- Elaborar sub-ensamblajes de fácil construcción, debido a que en la realidad no es posible colocar fácilmente un objeto al centro de un tubo.
- Manejo de tolerancias adecuadas en los modelos, ya que en la fabricación los cortes realizados manualmente no son tan precisos.

En la figura 40, se observa la descripción de armado que permite su interpretación.

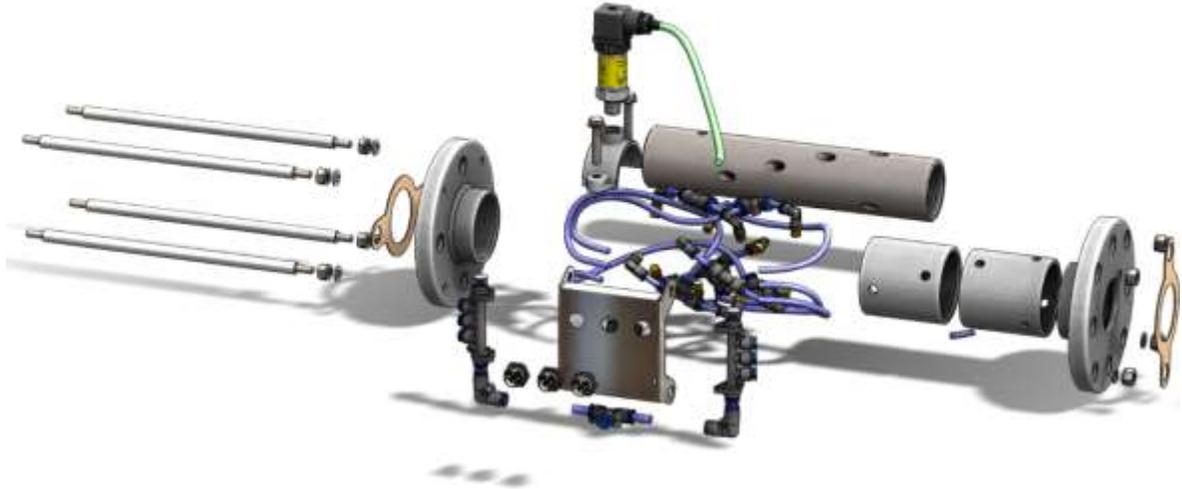


Figura 40 Ensamble de un carrete, en la fase del diseño detallado del modelo.
Fuente: Elaboración propia.

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 unas condiciones operativas específicas.

3.4. VALIDACIÓN

Después de la etapa de diseño de detalle el producto se verifica el cumplimiento de los objetivos, todas las características planteadas como seguridad, calidad, confiabilidad y mantenimiento. Para ello se realizan mediciones de sus características a través de un proceso iterativo.

La validación misma consiste en obtener los mismos resultados en función de algo establecido, y que bajo condiciones de repetibilidad y reproducibilidad obtendremos los mismos resultados.

3.4.1. Estudio CDF

El estudio consiste en modelar virtualmente cada modelo con sección de tubería aguas arriba y aguas abajo, junto con los carretes mezcladores, las condiciones de frontera en la entrada son con referencia a el mapa topológico de Beggs y Brill y salida a presión atmosférica. Se visualiza el comportamiento de aire interactuando con el agua durante su paso en la sección virtual. El mapa creado por Beggs y Brill de 1973, desarrolló su modelo experimental con tubería de 2 pulgadas con flujos variantes de agua y aire, y su salida a presión atmosférica, en la

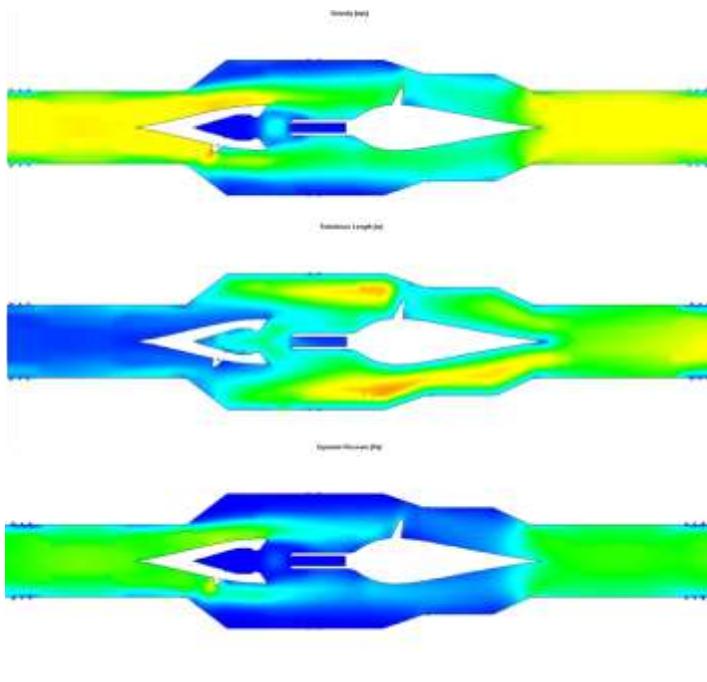


Figura 41 se aprecia estos modelos. Es importante señalar que para diferenciar los regímenes de flujo Beggs y Brill agruparon visualmente por 4 grupos, los cuales pueden tener más de un solo régimen de flujo.

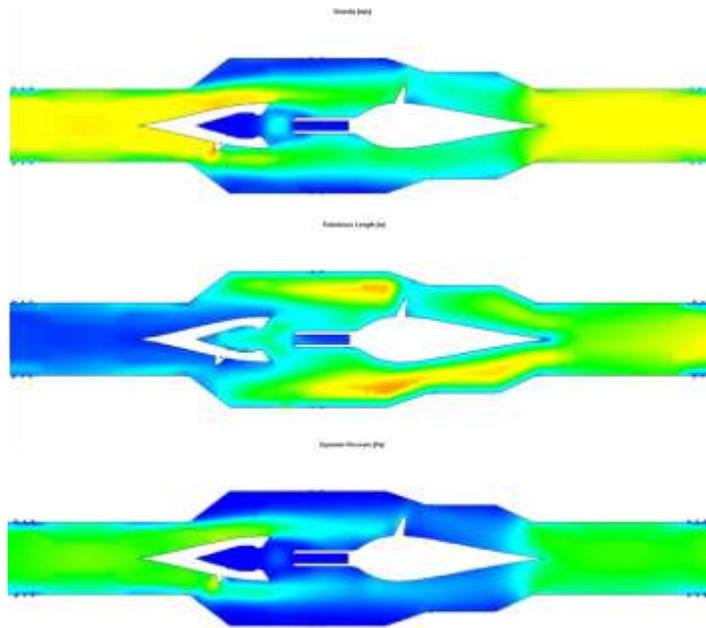


Figura 41 Ejemplo del modelado por CFD para observar el comportamiento de los regímenes de flujo.
Fuente: Elaboración propia.

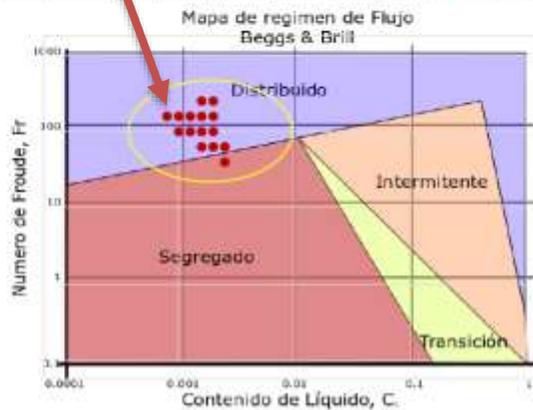
Debido a que los mapas de regímenes fueron obtenidos mediante observación, las simulaciones virtuales permitirán apreciar gráficamente si es aceptable o no dentro la formación del régimen, Las gráficas obtenidas se agrupan en una tabla clasificada por el valor del caudal de agua y caudal de aire, bajo criterio visual definir los límites del mapeo y compáralo con el Mapa de Beggs y Brill, y obtener las conclusiones sobre el diseño del mezclador, observe la Tabla 2.

Tabla 2 Ejemplo de tabla de resultados de las pruebas de flujo a diversas condiciones, y comparativo al mapa topológico de regímenes de flujo.

DISEÑO DE UN SISTEMA SIMULADOR FÍSICO DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO SEMEJANTES A LAS REALES

Pruebas del modelos CFD Carrete 1

| Presión (psi) | Vel. líquido (m/s entrada) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2 | |
| 0.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.5 | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | | | | | 1 | |
| 1 | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 2.5 | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | 1 |
| 40 | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 80 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 100 | | | | | | | | | | | | | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | 1 |



Por medio de las pruebas y repeticiones, se puede corroborar que el diseño satisface o permite recrear con un mayor alcance, las condiciones reales, Los resultados favorables indican que la propuesta nos acerca hacia la ruta más adecuada del diseño, y no es limitativo que puede ser mejorable.

Los resultados presentados, indican concluyentemente que la propuesta de diseño es viable para el desarrollo, y conformar los costos, materiales y tiempo de adquisición y recomendaciones para su concepción.

4. CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1. CONVERSIÓN DE LA TOPOLOGÍA DE BEGGS AND BRILL

El modelo de beggs and brill, permite establecer la caída de presión en una tubería recta debido al flujo de fluido de dos fases en cualquier dirección desde horizontal a vertical. El experimento de Beggs and Brill caracteriza los regímenes, la razón de la mezcla, la caída de presión y el número de Froude.

Para poder realizar las pruebas virtuales por CFD, se utilizará el método de beggs and brill en el cual se mantendrán algunos valores constantes mientras que otros serán variables, lo anterior para construir la matriz de pruebas y el régimen de beggs and brill.

Se utiliza la hoja cálculo, en la página de red [//checalcalc.com](http://checalcalc.com), Figura 42 en el cual se introducen las variables y unidades y calcula el número de Froude y el régimen de Beggs and Brill.

| Section | Parameter | Value | Unit |
|--------------|-------------------|--------------|---------|
| Pipe | Inside Diameter | 30.470 | mm |
| | Pipe Length | 1 | m |
| | Pipe Roughness | 0.0015 | mm |
| | Flow Direction | uphill | |
| | Inclination Angle | 0 | degrees |
| | Initial Pressure | 1.01325 | bar |
| Fluid | Mixture Ratio | 222.4 | g/h |
| | Density | 1254 | kg/m³ |
| | Velocity | 0.0014 | m/s |
| | Mixture Ratio | 0.222 | g/h |
| Result | Pipe ID | 30.470 | mm |
| | Flow Regime | Distribution | |
| | Liquid Holdup | 0.0732 | |
| | Mixture Density | 1201.502 | kg/m³ |
| | ΔP/m | 0.000 | bar |
| | Friction Factor | 1.8881 | |
| | Friction Factor | 0.0002 | bar |
| | Friction Factor | 0.0075 | bar |
| ΔP/m | 0.007 | bar | |
| Acceleration | 1.634242 | | |
| ΔP/m | 0.007 | bar | |

Figura 42 Hoja de cálculo Checalc, método de Beggs and Brill y régimen de flujo.
Fuente: [//checalcalc.com](http://checalcalc.com).

Las variables que se mantendrán cómo constantes durante la prueba se describen en la tabla a continuación Tabla 3:

Tabla 3 Tabla de variables aplicadas en la prueba de simulación CFD

| Características de la tubería | | |
|--------------------------------------|--------------------------|--|
| Diámetro nominal del tubo | CONSTANTE | El diámetro de todos los carretes es de 2 pulgadas |
| Rugosidad del Tubo (PVC) | CONSTANTE | La rugosidad del PVC es de 0.0015 mm |
| Largo de la tubería | CONSTANTE | La sección de simulación es 1 metro |
| Dirección del flujo | CONSTANTE | Es en un solo sentido aguas abajo |
| Ángulo de inclinación del tubo | CONSTANTE | La inclinación es horizontal 0° |
| Condiciones de trabajo de gas (Aire) | | |
| Flujo volumétrico del gas | VARIABLE AIRE | Representa la variable del eje X |
| Temperatura | CONSTANTE | Se realizará la simulación en el estándar 20°C |
| Presión | CONSTANTE | A condiciones atmosféricas 1.01325 bar |
| Densidad | CONSTANTE | La densidad estándar del aire 1204 Kg/m ³ |
| Viscosidad | CONSTANTE | La viscosidad estándar del aire 0.0018 cP |
| Condiciones de trabajo de gas (Aire) | | |
| Flujo volumétrico del líquido | VARIABLE AGUA | Representa la variable del eje Y |
| Densidad | CONSTANTE | A condiciones atmosféricas 1.01325 bar |
| Viscosidad | CONSTANTE | La densidad estándar del aire 1204 Kg/m ³ |
| Tensión Superficial | CONSTANTE | La viscosidad estándar del aire 0.0018 cP |
| Resultados | | |
| Patrón de Flujo | GRAF. RESULTADO | El régimen esperado |
| Número de Froude | GRAF. BEGG & BRILL EJE Y | Este valor es para relacionar en el mapa de Begg & Brill para el eje Y |
| Coefficiente de Hold up C_L | GRAF. BEGG & BRILL EJE X | Este valor es para relacionar en el mapa de Begg & Brill para el eje X |

Se realiza el cómputo con la hoja de cálculo utilizando los datos de la tabla anterior y variando los datos de velocidad del agua y aire (considerados en una matriz) con ello se determina el régimen de flujo por el método de Beggs and Brill.

En el mapa de Beggs and Brill la escala es logarítmica, es decir, va desde 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000, por lo tanto, la escala del eje en la matriz de velocidad está representada de manera logarítmica.

Los resultados de la conversión del mapa de distribución de Beggs and Brill se muestran en la Tabla 4, se distinguen por colores y letra los grupos de régimen

es. La conversión del mapa de Beggs and Brill cambia las coordenadas, en este caso, los ejes, "Y" Número de Froude (Fr), por el caudal del flujo en el agua y el eje "X" Coeficiente Hold Up (CL) por el caudal del flujo de aire.

Tabla 4 Conversión de la topología de Beggs and Brill (comparación para la prueba CFD).

| Flujo Agua ft3/h | Flujo de Aire ft3/h | | | | | | | | | | | | | | | ft3/h | m3/h | |
|------------------|---------------------|------|------|-------|-----|-----|-----|------|---|---|---|-----|----|----|----|-------|--------|-------|
| | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.085 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 0.85 | 1 | 3 | 5 | 8.5 | 10 | 30 | 50 | | | |
| 0.01 | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | | | 0.01 | 0.022 |
| 0.03 | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | | 0.03 | 0.067 |
| 0.05 | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | | 0.05 | 0.111 |
| 0.085 | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | | 0.085 | 0.189 |
| 0.1 | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | s | | 0.1 | 0.222 |
| 0.3 | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | s | s | s | s | | 0.3 | 0.667 | |
| 0.5 | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | | 0.5 | 1.112 | |
| 0.85 | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | i | i | i | | 0.85 | 1.89 | |
| 1 | t | t | t | t | t | t | t | t | t | t | i | i | i | i | | 1 | 2.224 | |
| 3 | i | i | i | i | i | i | i | i | i | i | i | i | i | i | l | 3 | 6.672 | |
| 5 | d | d | d | d | d | d | d | i | i | i | i | i | i | i | l | 5 | 11.12 | |
| 8.5 | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | i | i | i | i | l | 8.5 | 18.904 | |
| 10 | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | i | i | i | l | 10 | 22.24 | |
| 30 | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | | 30 | 66.72 | |
| 50 | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | d | | 50 | 111.2 | |

| | |
|---|--------------|
| s | segregado |
| d | distribuido |
| t | transición |
| i | intermitente |

Una característica notable en el mapa de colores es que los regímenes hacen transición conforme aumenta el flujo del agua, sin importar el aire en bajos caudales. Solo predomina en un aumento del régimen intermitente, indicado en color amarillo cuando es elevado el flujo volumétrico del aire.

4.2. GENERADOR DE BURBUJAS

El flujo de burbujas está dentro del grupo de flujo tipo distribuido y se caracteriza por el arrastre de burbujas de aire suspendidos en la fase líquida. Se desea un elemento que favorezca la formación de burbujas en una sección de tubería ordenada y controlada.

4.2.1. Esquema Base

La propuesta base es tener una sección corta de tubería, en la cual se perforen alrededor de la circunferencia del tubo orificios de menor diámetro, para la inyección de aire, el cual será arrastrado sobre el líquido. La propuesta de diseño está ilustrada en la Figura 43

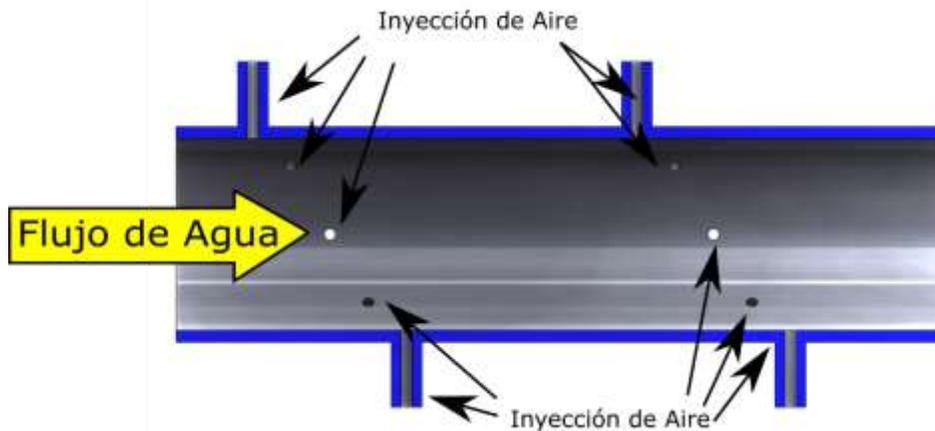


Figura 43 Propuesta base para inducir un flujo burbujas.
Fuente: Elaboración propia.

La inyección de aire debe ser intermitente, debido a que, si es elevado el flujo, ocasionará un chorro que genere demasiada turbulencia.

La gravedad del fluido permite que las burbujas se suspendan durante el avance de fluido de agua, hasta que las burbujas de manera natural asciendan hasta la parte superior del tubo, para agruparse en bolsas de aire.

4.2.2. Simulación de flujo CFD

La experimentación del diseño base se realiza en 2D en el software Fluent Ansys para un flujo bifásico de agua y aire por medio de CFD, con una sección rectangular a medida de 2 pulgadas de ancho que representa el diámetro del tubo, y secciones pequeñas que representan la inyección del flujo de aire. La prueba consiste en simular realizar simulaciones conforme a una matriz de condiciones de caudal de aire y agua, 56 pruebas de simulaciones a diversos caudales, definidos en la tabla modelada por Beggs and Brill y los resultados se muestra en la Figura 44 que se añade en el anexo (b).

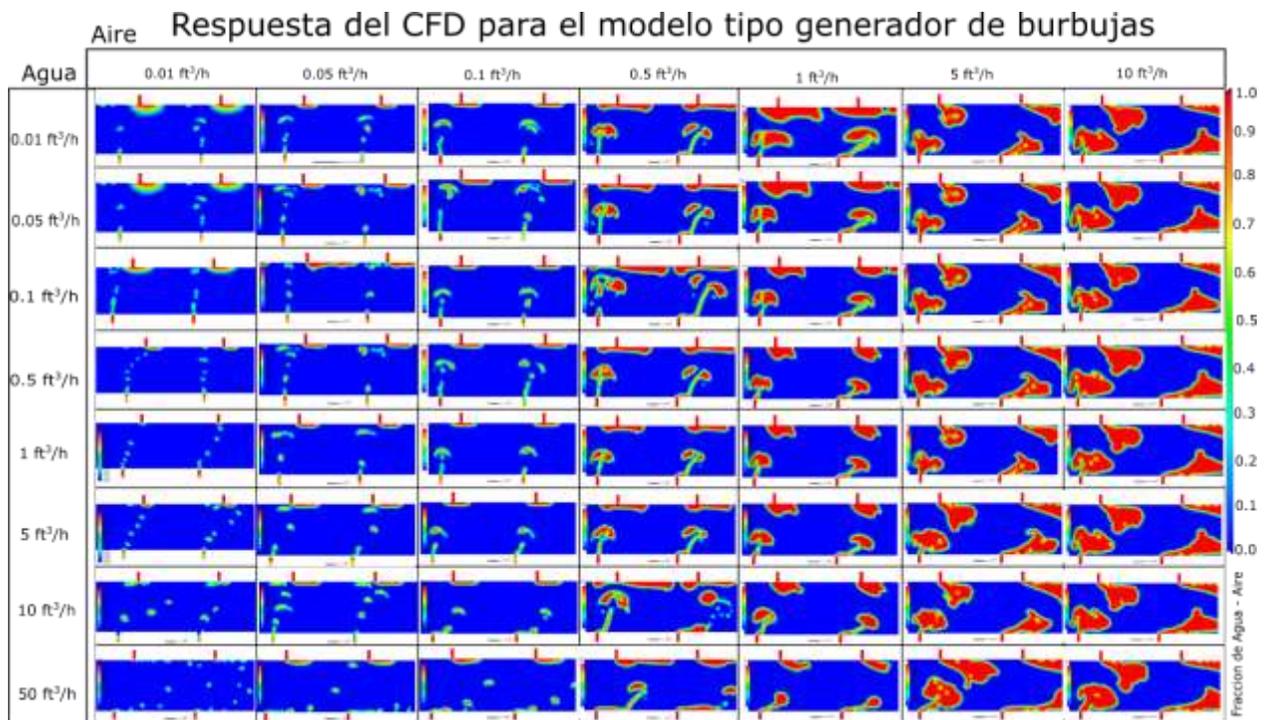


Figura 44 Resultados CFD para el generador de burbujas (anexo b).
Fuente: Elaboración propia.

La escala gráfica de colores indica la fracción de agua y aire, la sección en color azul representa la fracción de agua y la sección en rojo representa la fracción de aire.

La respuesta de la simulación indica que, para obtener un buen arrastre de burbujas, es ideal tener el mayor caudal de agua, con bajo flujo de aire, así es posible generar arrastre de burbujas pequeñas que van en el intervalo de

0.01 ft³/h y 0.1 ft³/h. Mientras que, en velocidades menores de 1ft³/h de líquido, propicia la formación de bolsas de aire, por la coalescencia de la burbuja.

4.2.3.Comparación de resultados, respecto a Beggs and Brill

Mediante la observación se pueden distinguir cómo se distribuyen las fases y cómo se presentan sus características que definen al flujo tipo burbujas dentro de matriz gráfica de resultados CFD.

Los resultados de flujos son observados en la simulación que corresponden a la tabla de Beggs and Brill en la Figura 45. Se observa en la ilustración resaltada en verde que hay presencia de arrastre de pequeñas burbujas y que el movimiento del líquido no permite la cohesión de las burbujas a pesar de que tienden a subir.

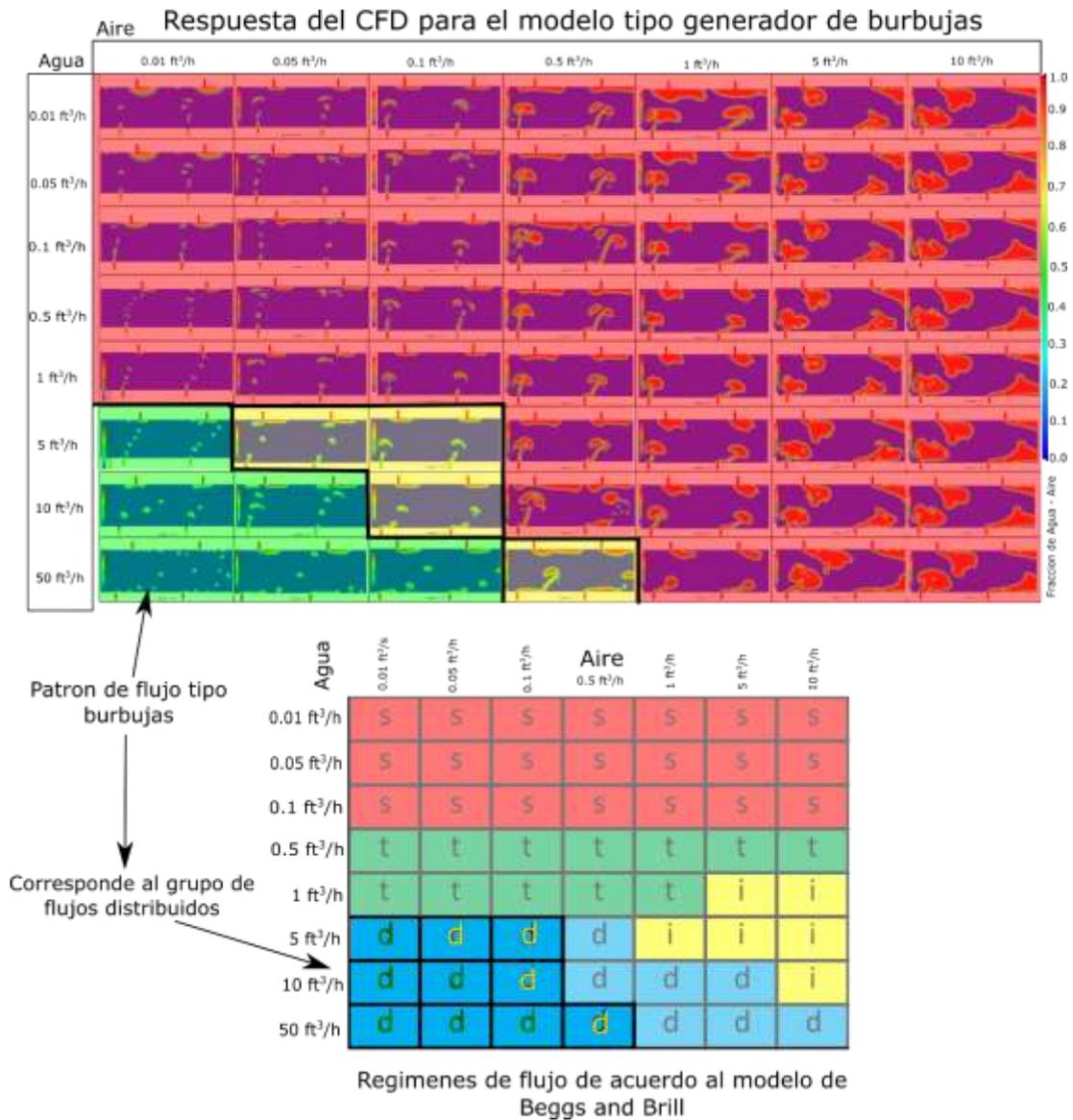


Figura 45 Comparación del CFD y Mapa de Beggs and Brill.
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el mapa, están marcados en color verde las respuestas del CFD en la cual es propio del flujo tipo burbujas, y en amarillo aquellos en los cuales están en transición. Corresponden al grupo de flujo distribuido en el mapa de Beggs and Brill, y se puede concluir que es satisfactorio el uso de este diseño base para el desarrollo del simulador de flujo tipo burbujas.

Se describen los siguientes resultados durante las pruebas.

Ventajas:

- Es posible generar un flujo tipo burbujas en una sección corta de tubería.
- Se requiere menor energía para inducir el flujo, menor volumen de agua y menor sección de tubería.
- El tamaño de las burbujas puede controlarse en función del volumen de aire inyectado.
- Es posible mantener un flujo constante de burbujas evitando la formación de baches.
- Durante las pruebas de flujo con simulador, se puede conocer el porcentaje de sustancia introducidas en la mezcla.
- Es posible establecerla frecuencia en la cual se generan las burbujas de manera controlada.

Recomendaciones:

- Al introducir las burbujas es posible un ligero aumento de la velocidad en la mezcla, disminución en la presión y cambio de la densidad del fluido por las condiciones de la mezcla ($\% \text{ agua} \times \rho \text{ agua} + \% \text{ aire} \times \rho \text{ aire}$).
- Es necesario registrar los cambios del fluido durante la mezcla y corregir valores en la entrada para obtener una medición deseada.

4.3. DISEÑO DEL SIMULADOR DE BURBUJAS

4.3.1. Diseño final

Con base a los diseños básicos, los ajuste en función de los resultados de funcionalidad y una vez aceptada las características del flujo, se recrea el diseño a detalle de un carrete simulados de flujo tipo burbujas, el cual se muestra en la Figura 46.



Figura 46 Diseño final, carrete simulador de flujo burbujas.
Fuente: Elaboración propia.

La propuesta final queda presentada en las hojas de diseño y con el respectivo explotado añadido en el anexo (c) y (d) del documento, donde se indican las dimensiones de las partes y su ensamble.

El carrete de régimen burbujas, se caracteriza por ser una sección corta y bridada en sus extremos para ser ensamblada en un sistema de flujo, en el cuerpo de la tubería se proponen 12 pequeñas perforaciones distribuidas a lo largo su circunferencia, con conectores rápidos neumáticos de $\frac{1}{4}$ " de pulgada de diámetro, enlazados a través de tubería que va hacia una placa de interfaz frontal. Se instala un sensor de presión de agua en la parte superior, con el propósito de registrar la presión de llegada y mediante un sistema de control retroalimentado, permita establecer la presión de inyección de aire al generador de burbujas. Se utilizan válvulas neumáticas contraflujo, observe la Figura 47.



Figura 47 Características del simulador de flujo de régimen burbujas.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Modelado

A través del software de diseño es posible modelar un flujo y determinar que el diseño permite mantener suspendido partículas de aire dentro de un flujo de agua, siempre y cuando la velocidad del líquido supere la velocidad de la flotabilidad, las partículas no se aglomeran con facilidad. El límite de inestabilidad es bajo, las partículas son arrastradas por el fluido que tiene una velocidad mayor que el gas.

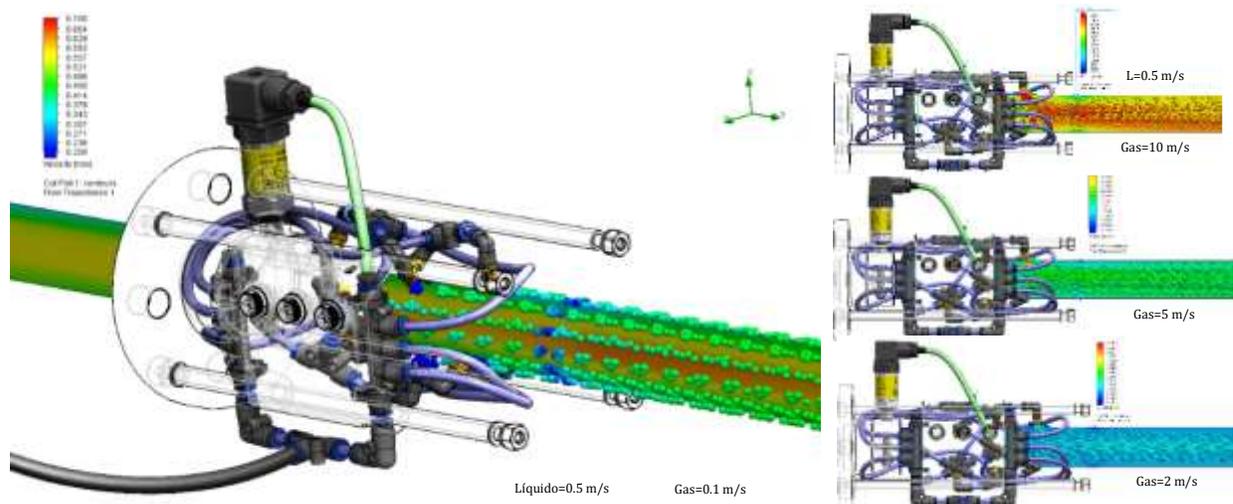


Figura 48 Modelo del simulador de flujo de régimen burbujas.
Fuente: Elaboración propia.

Al aumentar la velocidad del gas no se acerca a los límites de transición de régimen, cómo se observa en la Figura 48 aumenta la mezcla homogénea, y la distribución de las burbujas es mayor hacia el centro. Se espera que mediante la fabricación y puesta de operación se determinen los límites de trabajo en función de los equipos utilizados.

4.3.3. Límites de operación

Los límites de operación del sistema de acuerdo con el modelo CFD, que corresponden al grupo de regímenes distribuidos del mapa Beggs & Brill, las burbujas se pueden reproducir entre los flujos de fases descritos en la Tabla 5.

Tabla 5 Límites de operación para simular flujo burbujas

| | Fase Líquida (agua) | Fase Gaseosa (aire) |
|-----------------|------------------------|-------------------------|
| Límite Inferior | 10 ft ³ /h | 0.01 ft ³ /h |
| Límite Superior | 50 ft ³ /h | 0.1 ft ³ /h |

Los límites de operación son de acuerdo con la escala utilizada en la prueba CFD, y no dentro del mapa establecido por Beggs & Brill, el modelo CFD generador de burbujas se observa en la Figura 49 en la escala de agua a 50 ft³/h y aire a 0.01ft³/h.

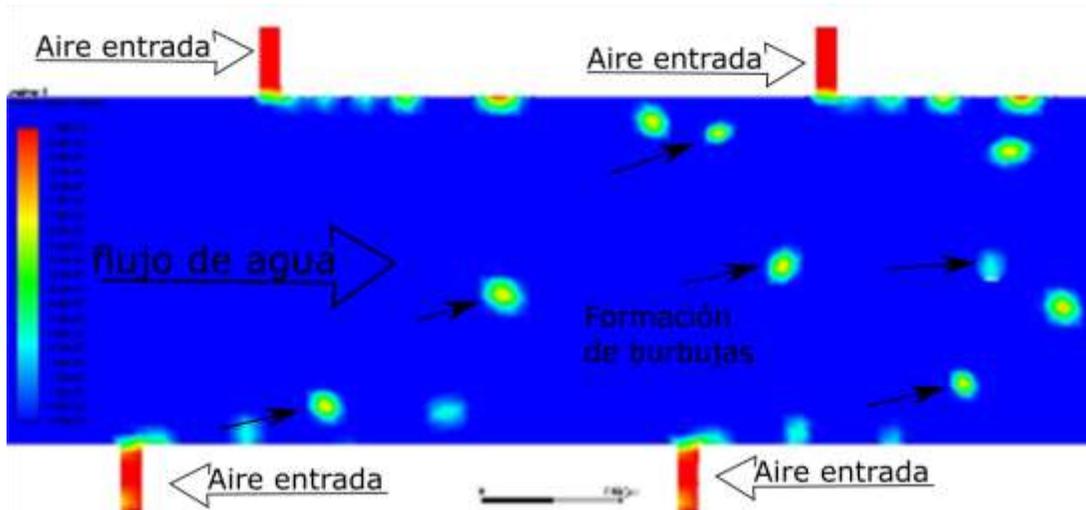


Figura 49 Generador de burbujas con agua a 50 ft³/h y aire a 0.01ft³/h.
Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Materiales y costos

El desarrollo del carrito simulador de flujo tipo burbujas, esta propuesto básicamente en tubería de PVC cédula 40, a un diámetro nominal de 2 pulgadas de diámetro, los componentes principales son la inyección de aire por conectores rápidos neumáticos. El único componente electrónico es el sensor de presión, además de su cableado e interconexión, el costo en el mercado de todos los componentes se estima en \$3 963.05, cuya lista de materiales se añade en el anexo (e), junto con las referencias a las páginas de los vendedores utilizados.

4.4. GENERADOR DEL RÉGIMEN ANULAR

El flujo anular, catalogado dentro del grupo de flujo tipo segregado, se caracteriza por el alto flujo de gas viajando al centro de la tubería, con un arrastre líquido en la superficie interna del tubo, el desplazamiento del agua es mucho lento que el aire y debido a la viscosidad y fuerza del aire se mantiene adherido al interior de tubo.

4.4.1. Esquema Base

Se propone realizar en una sección corta de tubería, un dispositivo que dentro del flujo de agua se obligue a adherirse a la pared interna de la tubería, pero, a la vez se introduzca un chorro de aire con gran velocidad, y la abertura del cono introducir un flujo alto de aire para evitar la cavitación por las fuerzas de choque de los elementos. Observe la propuesta base, ilustrada en la Figura 50

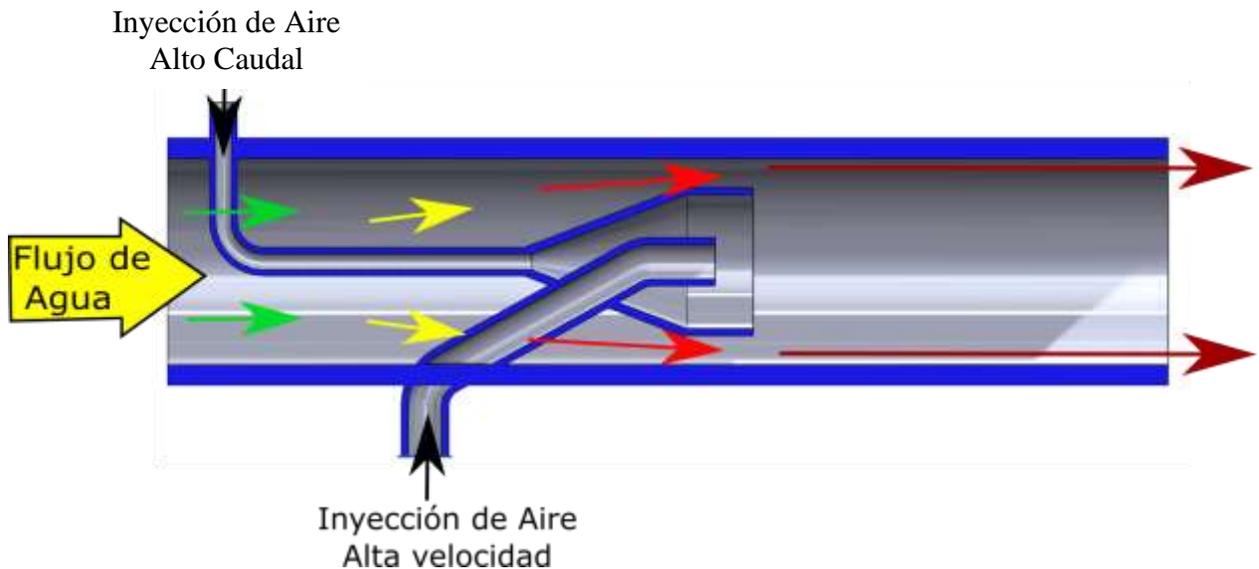


Figura 50 Propuesta base para inducir el flujo anular.
Fuente: Elaboración propia.

El objetivo es adherir el líquido sobre la pared interna del tubo, hasta que el aire arrastre y sustente por la fricción entre los dos fluidos la suficiente agua. La capacidad de arrastre depende de la distancia de avance.

Es inevitable que la gravedad ocasione efectos secundarios, hasta que se el exceso de agua acumulada haga que descienda a la parte baja del tubo y forme flujos estratificados.

4.4.2. Simulación de flujo CFD

La experimentación del diseño base es con flujo bifásico de agua y aire por medio de CFD, representada por un rectángulo de 2 pulgadas de ancho que expresa al diámetro del tubo, y dentro una restricción triangular hueca que permite dispersar el flujo del líquido a los bordes. Por el centro hay una inyección de aire que permite simular el flujo central del régimen anular. La prueba consiste en simular una matriz de 8 x 7, con un total de 56 simulaciones a diversos caudales, definidos en la tabla modelada por Beggs and Brill y los resultados se muestra en la Figura 51 que se añade en el anexo (f).

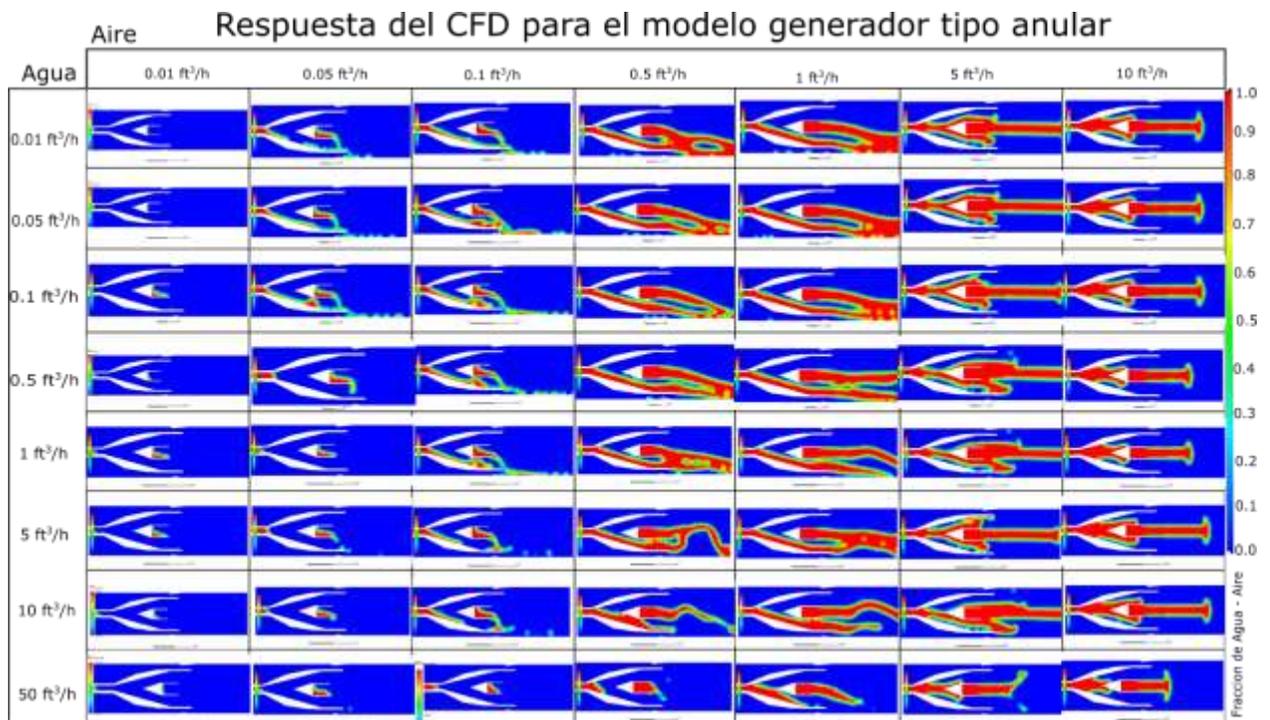


Figura 51 Resultados CFD para el generador de flujo anular (anexo f).
Fuente: Elaboración propia.

La escala gráfica de colores indica la fracción de agua y aire, es decir, la sección en color azul representa la fracción de agua y la sección en rojo representa la fracción de aire contenida.

En la tabla de simulación se puede observar que, para generar un flujo anular, se requiere alto flujo de aire sin importar la escala de agua debido a que no hay efectos de la gravedad presente, en la parte baja de la tubería.

4.4.3. Comparación de resultados, respecto a Beggs and Brill

Mediante la observación se pueden distinguir cómo se distribuyen las fases anulares en la sección alta de flujo de aire donde hay aparentemente flujo anular, pero no cumplen la característica de este régimen de flujo, debido a que, el valor de velocidad del agua en algunos casos supera la velocidad del aire, y es necesario definir ese límite.

Se toma de muestra la simulación de una columna de la matriz de Beggs and Brill para una mezcla con aire fluyendo a 10 ft³/h y determinar las velocidades de la mezcla con la escala de valores de flujo de agua, y los resultados de la gráfica se representa en la Figura 52.

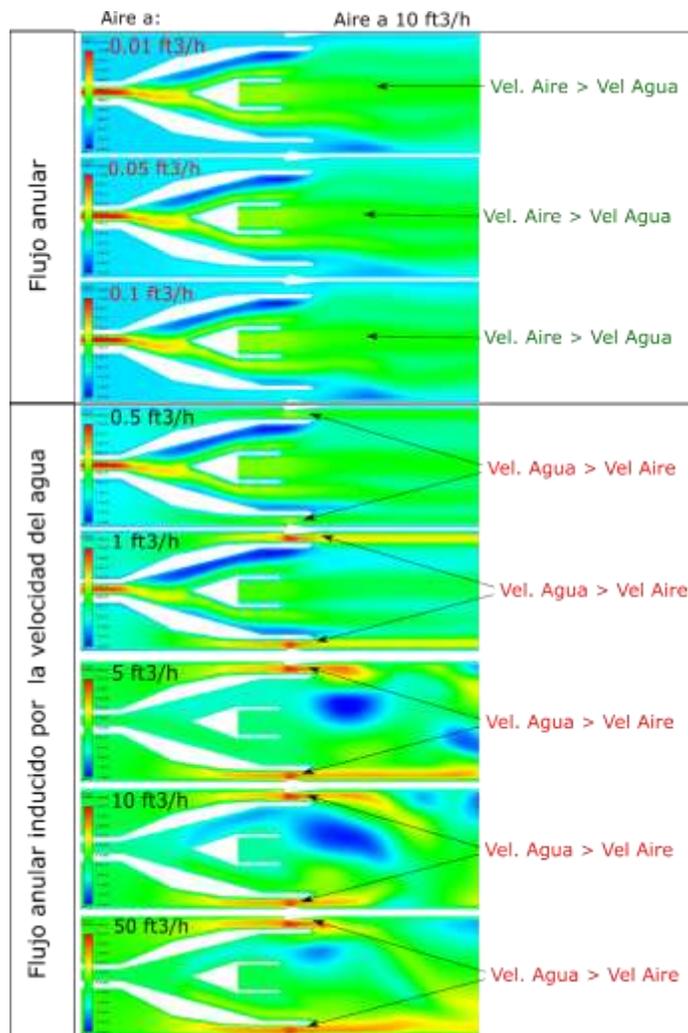


Figura 52 Simulación de velocidad de la mezcla.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, el flujo válido para un régimen anular simulado está dentro de la escala baja de velocidad de agua, es decir, de 0.01 ft³/h y 0.1 ft³/h.

En la Figura 53 se representa la respuesta del diseño en la simulación y cómo se identifican en la matriz del mapa de Beggs and Brill.

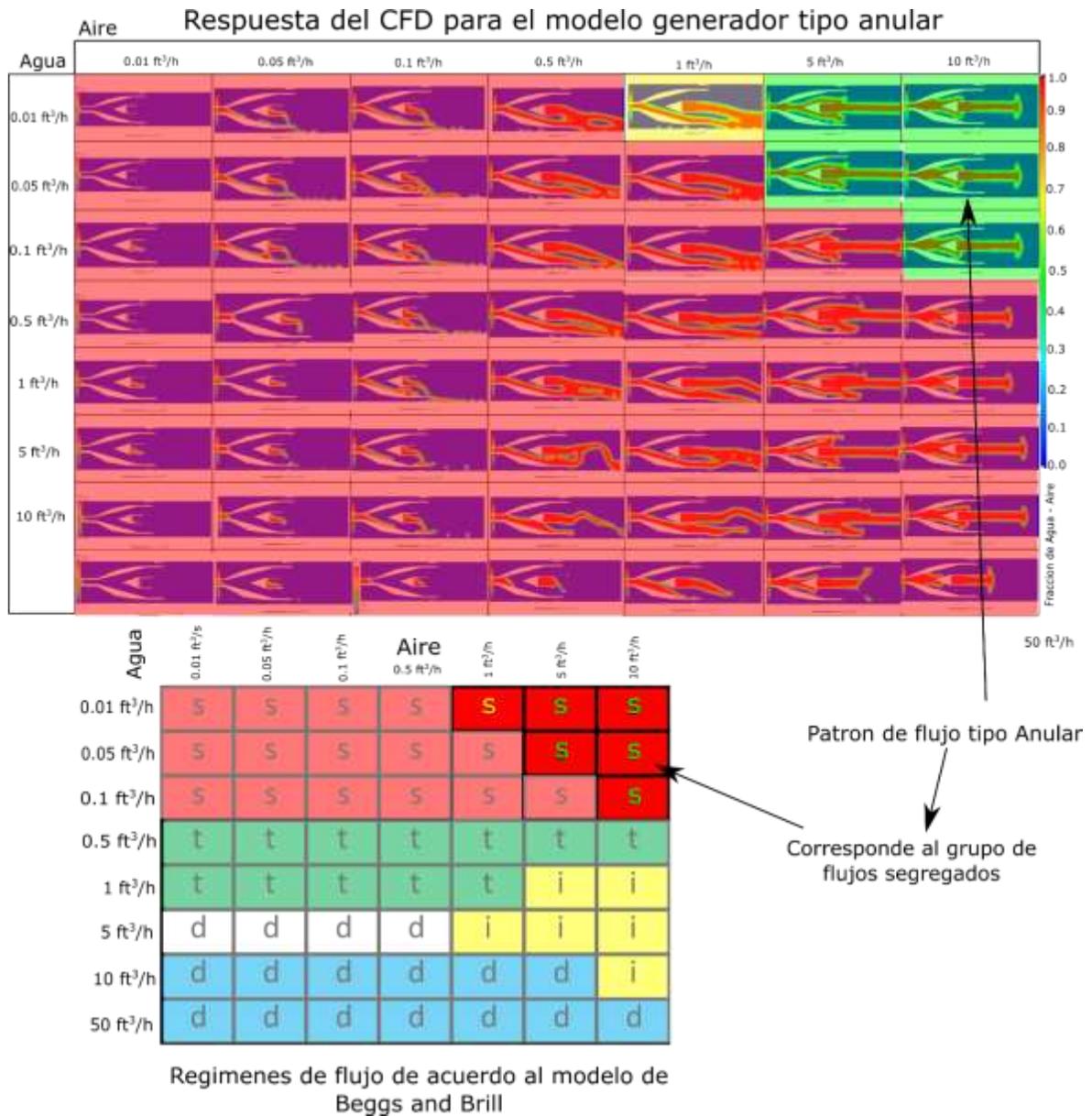


Figura 53 Comparación del CFD y Mapa de Beggs and Brill.
Fuente: Elaboración propia.

Como conclusión se muestran las ventajas y desventajas encontradas durante estas pruebas:

Ventajas:

- Es posible generar un flujo tipo anular en una sección corta de tubería.
- Se requiere menor energía para inducir el flujo, menor volumen de agua y menor sección de tubería.
- La velocidad de arrastre del agua y el gas puede controlarse en función del volumen de aire y agua inyectado.
- Es posible mantener un flujo constante para mantener un régimen anular estable.
- Durante las pruebas de flujo con simulador, se puede conocer el porcentaje de sustancia introducidas en la mezcla.

Recomendaciones:

- Es necesario que los insertos de restricción interna estén centrados y suficientemente fijos para permitir una adherencia del agua en las superficies internas de las paredes.
- Se debe considerar que la sujeción del elemento de restricción no ocasione turbulencia.
- El carrete debe ser capaz de ser revisado continuamente para verificar el centrado del elemento interno de restricción.

4.5. DISEÑO DEL SIMULADOR ANULAR

4.5.1. Diseño final

Con base a los diseños básicos, los ajuste en función de los resultados de funcionalidad y una vez aceptada las características del flujo, se recrea el diseño a detalle de un carrete simulados de flujo tipo anular, el cual se muestra en la Figura 54.

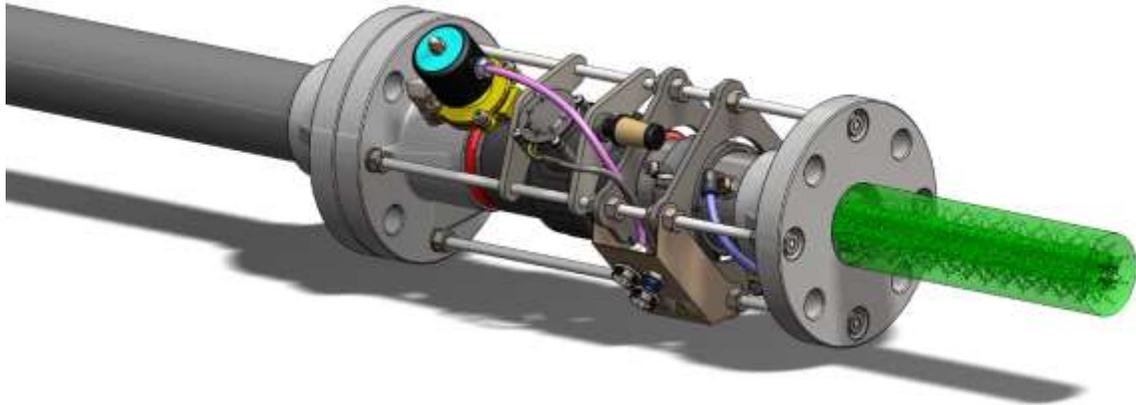


Figura 54 Diseño final, carrito simulador de flujo anular.
Fuente: Elaboración propia.

La propuesta final queda presentada en las hojas de diseño y con el respectivo explotado añadido en el anexo (g) e (h) del documento, donde se indican las dimensiones de las partes y su ensamble.

El simulador de régimen anular se compone de una sección corta de tubería de PVC de 2 pulgadas de diámetro en cédula 40, con extremos bridados, en el interior se centra un cono hueco de acero que restringe el flujo de agua a hacia las paredes de la tubería, el cono tiene una nariz tubular alargada de 0.5 pulgadas, igual de acero inoxidable, que sale por un costado del carrito para permitir la entrada de aire. A la salida de la abertura del cono se colocaron tres tubos de tubería de acero de 0.25 pulgadas, que permite introducir aire con velocidad mayor a la del agua. Esta fuerza central de aire permite sustentar el agua en las paredes de la tubería correspondiente al flujo anular, en la Figura 55 se muestran las partes internas y la presentación final del simulador. En la entrada de aire del cono, se propone una electroválvula seguido de un caudalímetro, cuya funcionalidad es el restringir fugas y contraflujo a la medición del aire.

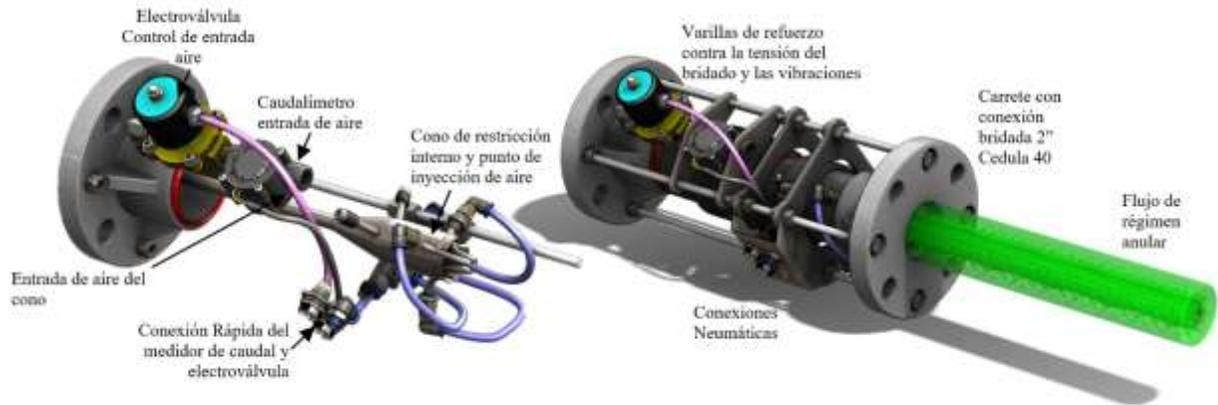


Figura 55 Características del carrete simulador de flujo de régimen anular.
Fuente: Elaboración propia.

4.5.2. Modelado

Se modela un flujo de líquido y gas dentro carrete de flujo anular, la entrada de líquido es de 5 m/s y 10 m/s para aire; en la sección de entrada del cono se condiono a presión atmosféricas, con el fin de ver la caída de presión dentro del cono y la demanda de aire hacia el interior, mostrado en la Figura 56.

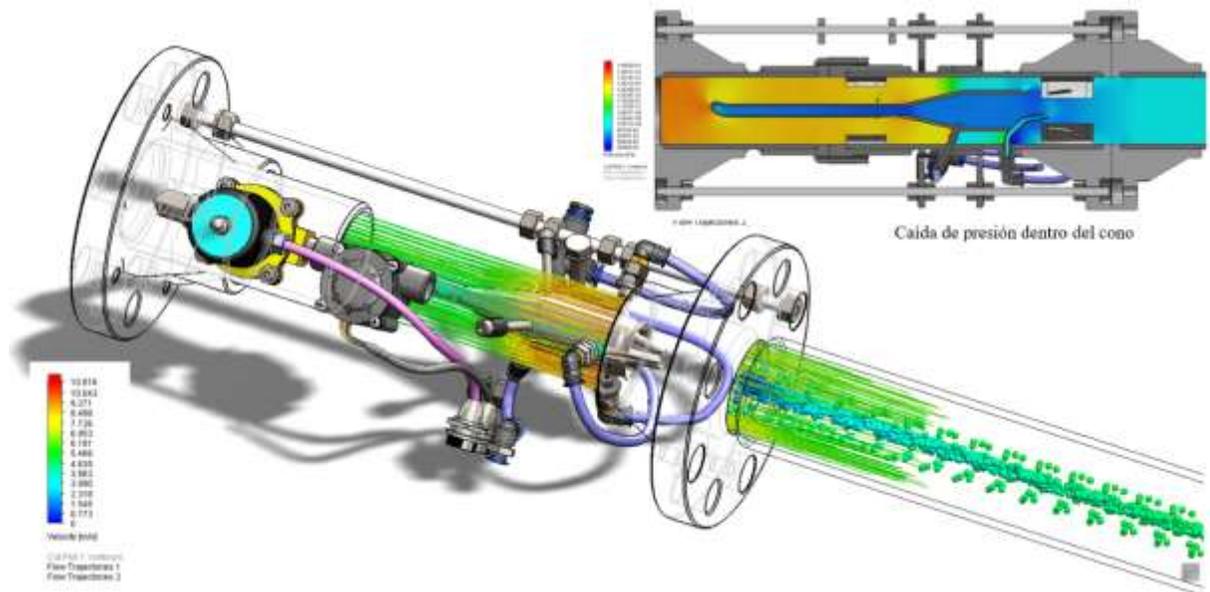


Figura 56 Modelado del carrete simulador de flujo de régimen anular.
Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la Figura 57 cómo el líquido se mantiene “adherido” en las paredes de la tubería por la tensión superficial, por otra parte, que el flujo de aire fluye con mayor velocidad en el núcleo, en la vista frontal y lateral se distinguen por esferas y líneas la distribución respectiva de las sustancias de la mezcla.

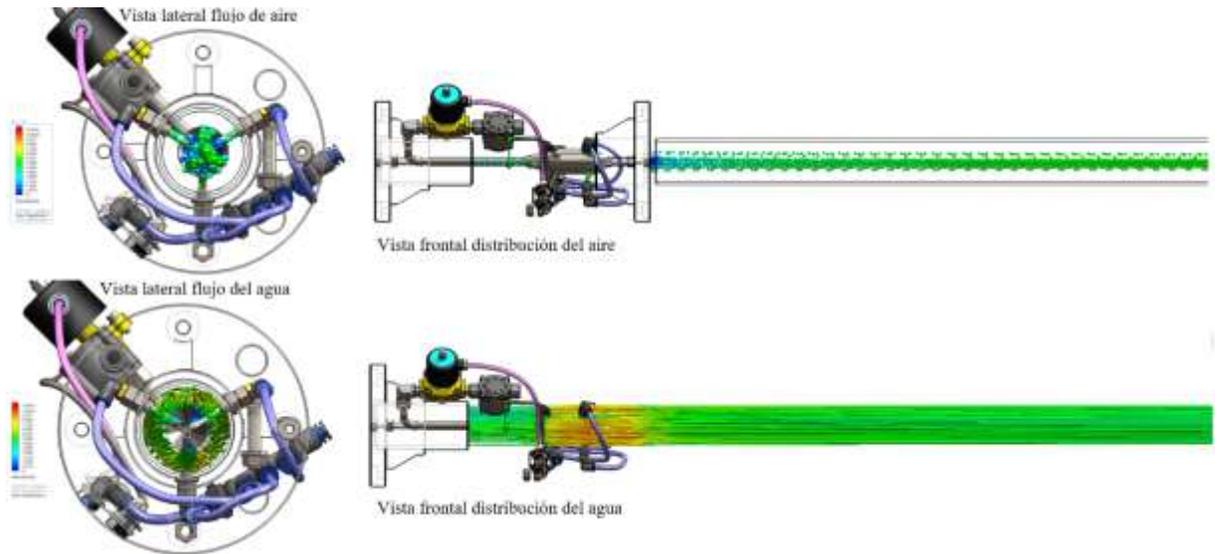


Figura 57 Simulación de flujo de régimen anular.
Fuente: Elaboración propia.

4.5.3. Límites de operación

Los límites de operación del sistema de acuerdo con el modelo CFD, que corresponden al grupo de regímenes distribuidos del mapa Beggs & Brill, el flujo anular se puede reproducir entre las velocidades de fase descritos en la Tabla 6.

Tabla 6 Límites de operación para simular flujo anular

| | Fase Líquida (agua) | Fase Gaseosa (aire) |
|-----------------|-------------------------|------------------------|
| Límite Inferior | 0.01 ft ³ /h | 5 ft ³ /h |
| Límite Superior | 0.1 ft ³ /h | 10 ft ³ /h |

Los límites de operación son de acuerdo con la escala utilizada en la prueba CFD, y no dentro del cálculo del mapa establecido por Beggs & Brill.

Se expresa cómo en la Figura 58 cómo se representa en el CFD un flujo anular, en él se muestra la fase gaseosa dentro al centro de la mezcla multifásico, además, de distinguir la velocidad de cada sustancia, correspondiendo al criterio que el gas viaja a mayor velocidad que la fase líquida.

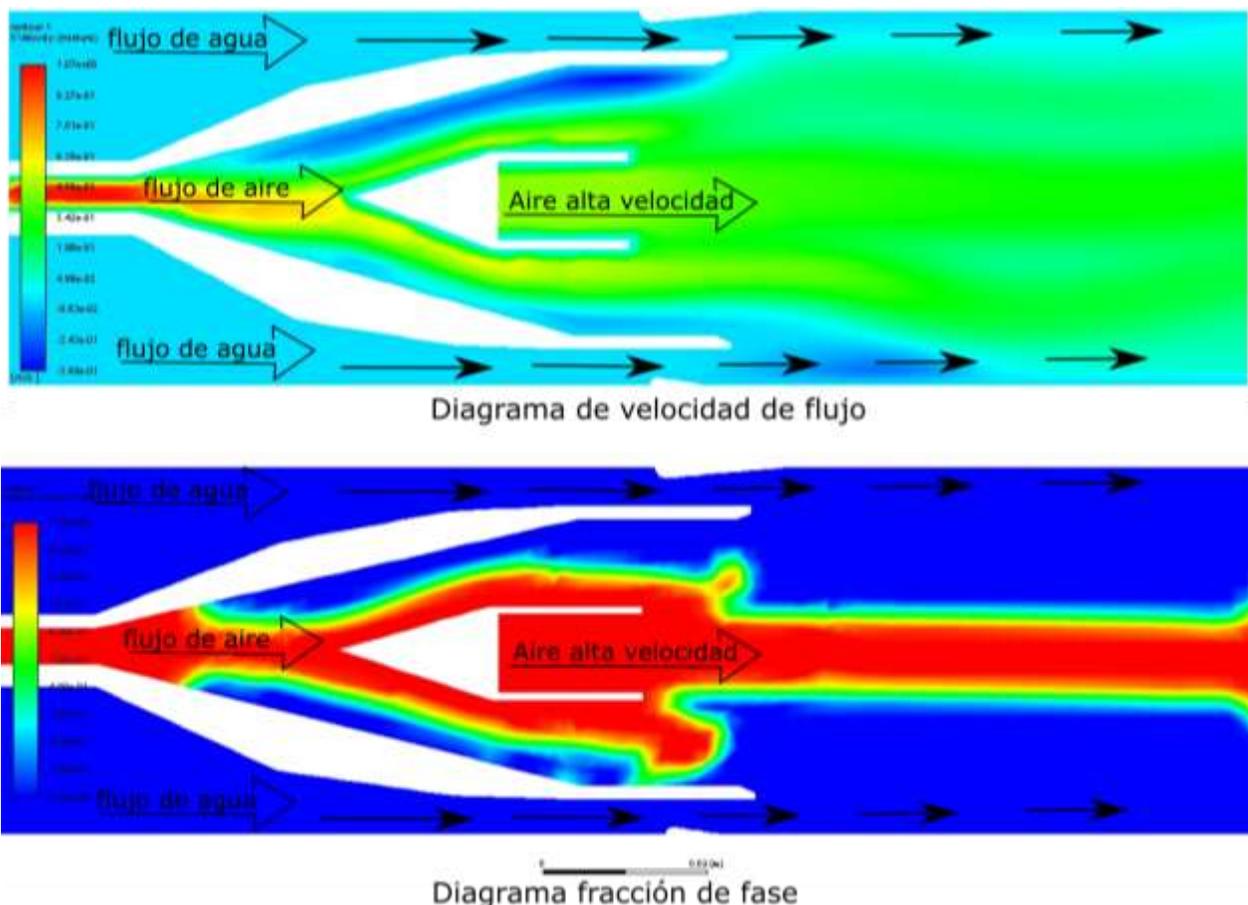


Figura 58 Flujo anular con agua a 0.05 ft³/h y aire a 10 ft³/h.
Fuente: Elaboración propia.

4.5.4. Materiales y costos

El desarrollo del carrito simulador de flujo tipo anular, esta propuesto básicamente en tubería de PVC cédula 40, a un diámetro nominal de 2 pulgadas de diámetro, los componentes principales son el medidor de flujo de aire, conectores rápidos neumáticos, una electroválvula, de media

pulgada todos, los elementos de acero inoxidable, y una placa lateral a modo de conexión rápida del dispositivo. El costo en el mercado de todos los componentes se estima en \$2 880.33, cuya lista de materiales se añade en el anexo (i), junto con las referencias a las páginas de los vendedores utilizados.

4.6. GENERADOR TIPO BACHES

El flujo tipo baches, catalogado dentro del grupo intermitente, se caracteriza la formación de grandes burbujas irregulares dentro del flujo líquido, la cual viajan de modo itinerante e irregular, además, viajan adheridos a las paredes internas superior de la tubería y que, por la fuerza de desplazamiento, la viscosidad toma forma de bolsas de aires denominadas "baches".

4.6.1. Esquema Base

La propuesta base es tener una sección corta de tubería, en la cual se introduzca un flujo significativo de aire, antes de ser arrastrado por el agua, la inyección de aire no es necesariamente a favor del flujo, cuando se produzca la burbuja se propone ensanchar la sección de la tubería para disminuir la velocidad y no propiciar la ruptura de la burbuja, esta descripción se representa en la Figura 59.

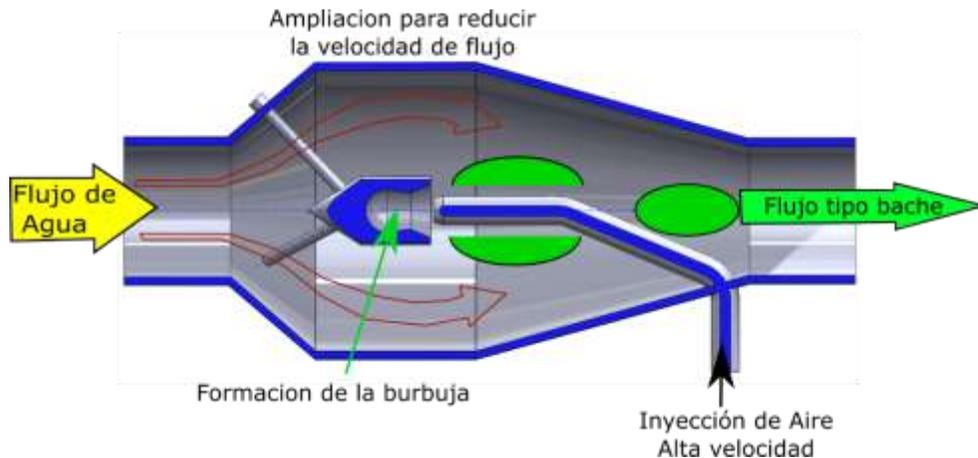


Figura 59 Propuesta base para inducir un flujo baches.
Fuente: Elaboración propia.

Cuando el fluido se encuentra en el área de mayor diámetro sufre un aumento de presión y una disminución de su velocidad cómo lo describe la ley de Bernoulli. Aprovechando esta característica de los fluidos se espera introducir una bolsa de aire al flujo, antes de que regresa al diámetro original de la tubería.

4.6.2.Simulación de flujo CFD

El modelo utilizado se crea por CFD en Fluent Ansys para un flujo bifásico de agua y aire, con una entrada rectangular de 2 pulgadas que se ensancha hasta 4 pulgadas en la sección media, y reduce gradualmente a 2 pulgadas en la salida, dentro de la figura esta la inyección de aire cómo se muestra en la idea base. La prueba consiste en simular una matriz de 8 x 7, con un total de 56 simulaciones a diversos caudales, definidos en la tabla modelada por Beggs and Brill y los resultados se muestra en la Figura 60 que se añade en el anexo (j).

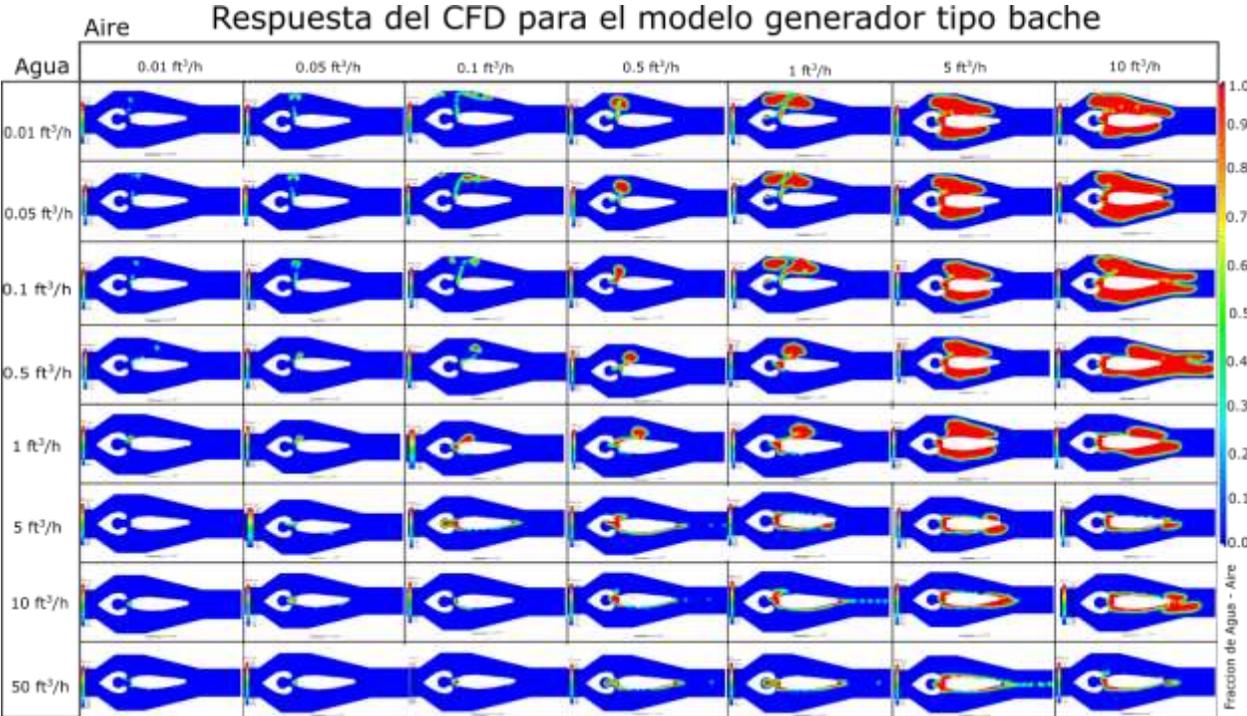


Figura 60 Resultados CFD para el generador tipo baches (anexo j).
Fuente: Elaboración propia.

La escala gráfica de colores indica la fracción de agua y aire, es decir, la sección en color azul representa la fracción de agua y la sección en rojo representa la fracción de aire contenida.

La respuesta de la simulación es algo complicado de entender, debido a que en altos niveles de flujo de agua no hay formación de bolsas de aire, solo arrastre de estratos, en bajos niveles de agua se desarrollan bolsas grandes de aire, pero no son arrastradas por la fuerza del agua, ocasionando un régimen estratificado. En tanto que a velocidad media de agua para la escala de Beggs and Brill, hay formación media de bolsas de aire y, además, las de caudal alto de aire logran desprenderse del carrete.

4.6.3. Comparación de resultados, respecto a Beggs and Brill

Mediante la observación se pueden distinguir cómo se distribuyen las fases y cómo se presentan sus características que definen al flujo tipo bache dentro de matriz gráfica de resultados CFD.

Los resultados de flujos son observados en la simulación que corresponden a la tabla de Beggs and Brill en la Figura 61. Se observa resaltados en color verde que hay presencia de baches de aire desplazados a través de líquido.

Esta prueba fue de las complicadas, ya que fue difícil de reproducir observando los resultados y reajustar el diseño, es posible definir que es el diseño final propuesto en este trabajo para un simulador de tipo baches, tienen los mejores resultados.

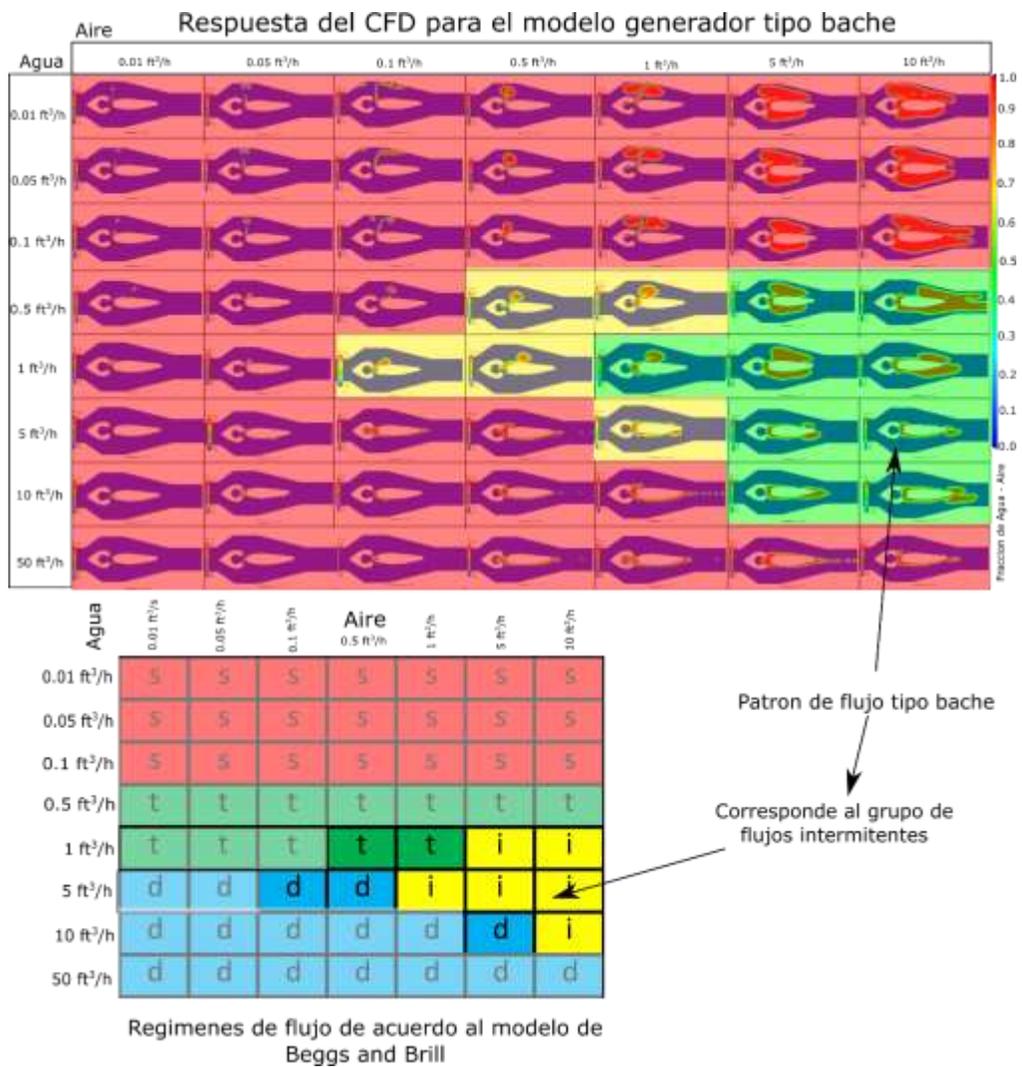


Figura 61 Comparación del CFD y Mapa de Beggs and Brill.
Fuente: Elaboración propia.

El mapa muestra que se propicia la formación de baches en la región intermitente de acuerdo con el modelo de Beggs and Brill, y se puede concluir que es satisfactorio el uso de este diseño base para el desarrollo del simulador de flujo tipo baches.

Se describen los siguientes resultados durante las pruebas.

Ventajas:

- Es posible generar un flujo tipo baches en una sección corta de tubería.

- Se requiere menor energía para inducir el flujo, menor volumen de agua y menor sección de tubería.
- La capacidad de los baches son de igual irregularidad que un sistema real. En este caso no es deseable la uniformidad cómo es para los otros diseños.
- Durante las pruebas de flujo con simulador, se puede conocer el porcentaje de sustancia introducidas en la mezcla.

Recomendaciones:

- Cuando se introduce el aire es posible la presencia de intermitencia en el bombeo de agua, y arrastre de flujos burbujas detrás de los baches.
- Es posible añadir mallas metálicas a la salida del simulador tipo baches para retener las pequeñas burbujas.

4.7. DISEÑO DEL SIMULADOR TIPO BACHES

4.7.1. Diseño final

Con base al diseño final de las pruebas de simulación, los resultados de funcionalidad y con características del flujo apropiadas al del grupo intermitente, se recrea el diseño a detalle de un carrete simulados de flujo tipo baches en la Figura 62.

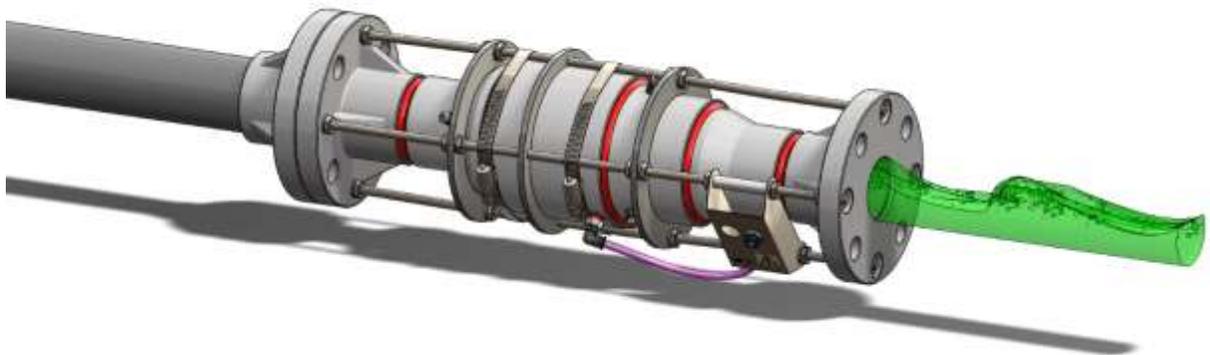


Figura 62 Diseño final, carrete simulador de flujo baches.
Fuente: Elaboración propia.

La propuesta final queda presentada en las hojas de diseño y con el respectivo explotado añadido en el anexo (k) y (l) del documento, donde se indican las dimensiones de las partes y su ensamble Figura 63.

El régimen de flujo de tipo bache se caracteriza por la presencia de grandes burbujas dentro de la tubería, y su avance crea pequeños espacios donde se parece al régimen de flujo tipo estratificado.

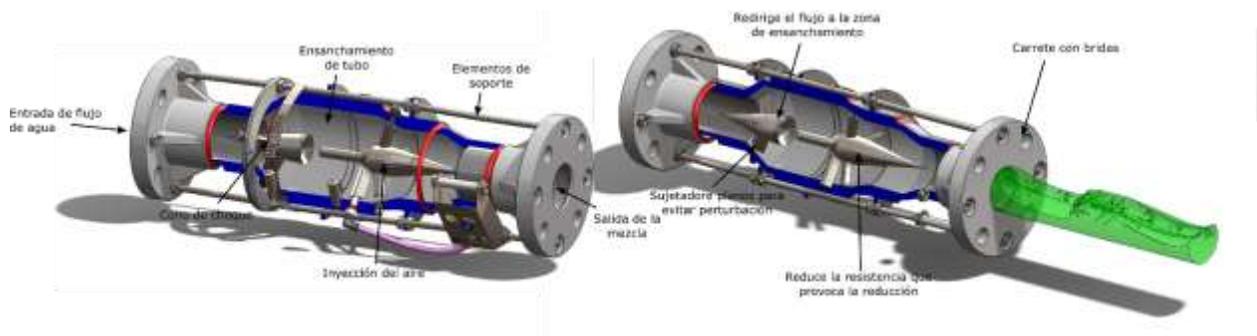


Figura 63 Características del carrete simulador de flujo de régimen baches.
Fuente: Elaboración propia.

Este modelo propuesto, es un carrete con un ensanchamiento de 2 pulgadas a 4 pulgadas, originando un aumento de presión y desaceleración de la velocidad, en el centro del carrete se localiza un cono, para apartar el flujo e introducir aire, en forma de baches.

4.7.2. Modelado

Se modela un flujo de líquido y gas dentro carrete de flujo baches, la entrada de líquido es de 3 m/s y 5 m/s para aire; al instante de entrar al ensanchamiento, el fluido aumenta la presión en los extremos de la ampliación, en el espacio central se hace introducir el aire de manera continua y produce un bache de aire cómo se muestra en la Figura 64.

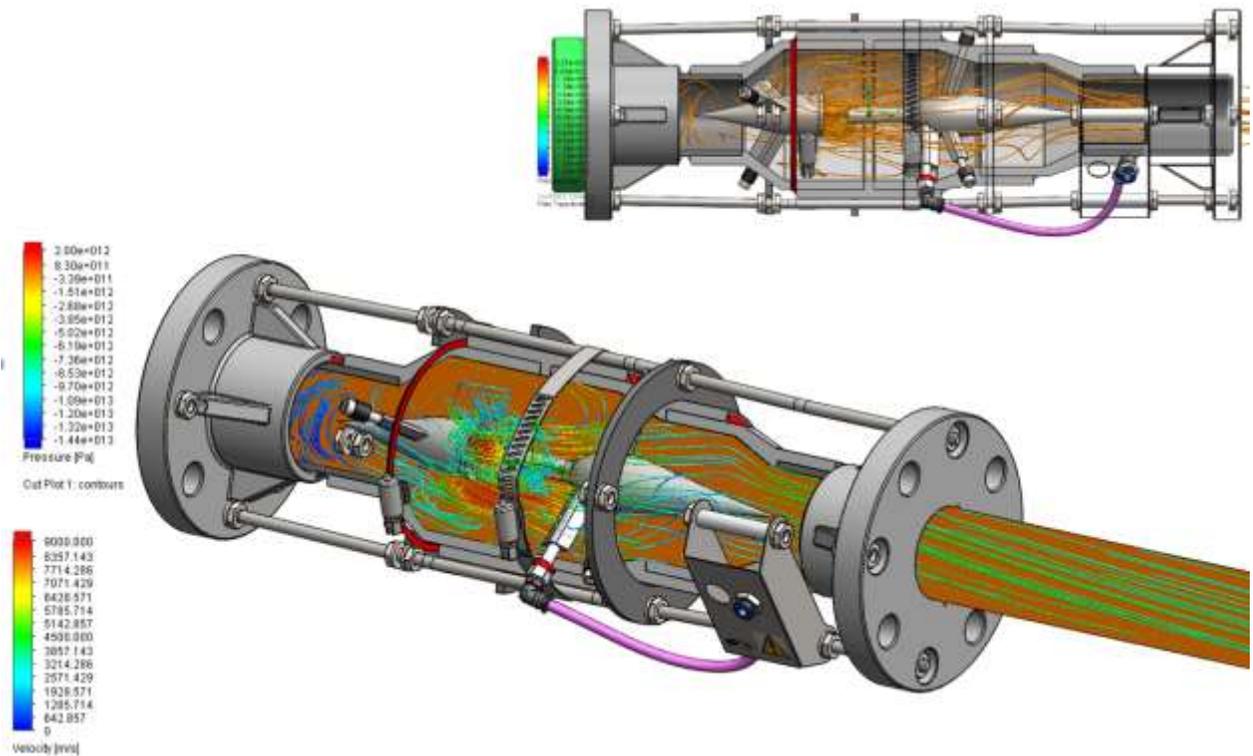


Figura 64 Modelado del carrito simulador de flujo tipo bache.
Fuente: Elaboración propia.

Se observa cómo de manera continua se forman baches de aire que continuará en el recorrido de la tubería.

4.7.3. Límites de operación

Los límites de operación del sistema de acuerdo con el modelo CFD, que corresponden al grupo de regímenes intermitente del mapa Beggs & Brill, los baches se pueden producir notablemente en el intervalo de operación descrito en la Tabla 7.

Tabla 7 Límites de operación para simular flujo tipo baches

| | Fase Líquida (agua) | Fase Gaseosa (aire) |
|-----------------|------------------------|------------------------|
| Límite Inferior | 1 ft ³ /h | 5 ft ³ /h |
| Límite Superior | 5 ft ³ /h | 10 ft ³ /h |

Los límites de operación son de acuerdo con la escala utilizada en la prueba CFD, y no dentro del mapa establecido por Beggs & Brill, el modelo CFD generador de burbujas se observa en la Figura 65.

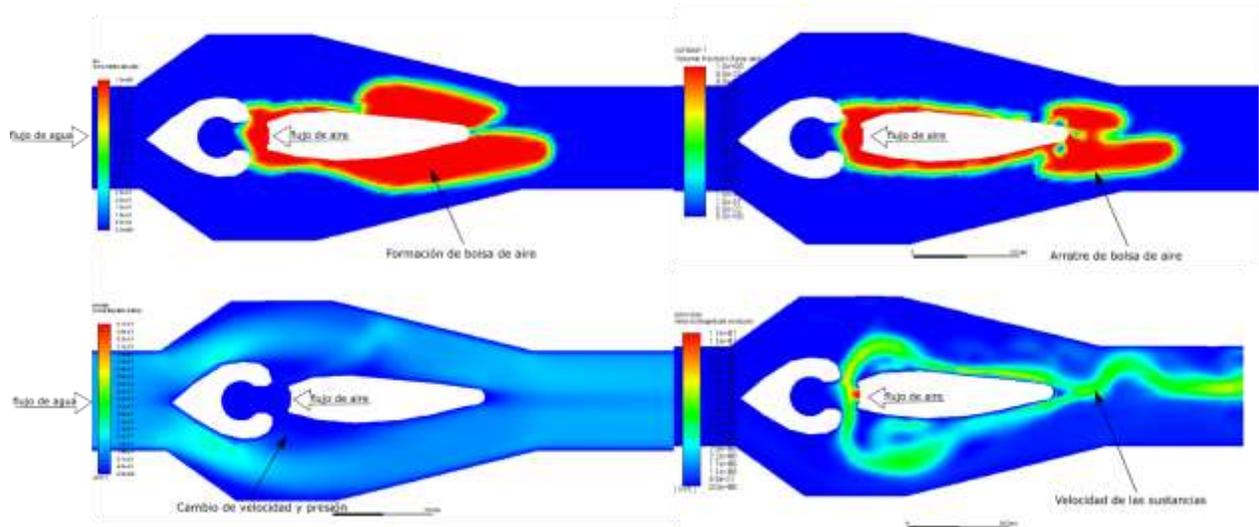


Figura 65 Generador de flujo tipo bache.
Fuente: Elaboración propia.

4.7.4. Materiales y costos

El desarrollo del carrito simulador de flujo tipo baches, esta propuesto básicamente en tubería de PVC cédula 40, a un diámetro nominal de 2 pulgadas de diámetro, el ensanche se realiza con tres accesorios, uno para ampliar y dos para reducir, los componentes principales son los accesorios internos maquinado de acero y por donde entrara el aire, conectores rápidos neumáticos, y elementos de sujeción; una placa lateral a modo de conexión rápida del dispositivo. El costo en el mercado de todos los componentes se estima en \$3 174.68, cuya lista de materiales se añade en el anexo (m), junto con las referencias a las páginas de los vendedores utilizados.

4.8. GENERADOR TIPO ESTRATIFICADO

El flujo estratificado está catalogado dentro del grupo de flujo tipo segregado, se caracteriza porque las fases de los fluidos viajan separadas con poca perturbación. Normalmente a bajos caudales, y donde el agua a

diferencia del aire viaja rápido sobre la parte superior de la sección circular de tubo.

4.8.1. Esquema base

Se propone un dispositivo que interrumpa la continuidad de la sección recta de un sistema de tubería, a través de un arreglo de manguera rígida, codos y reducciones se aumente la velocidad de chorro de agua en una caída por gravedad, y se gane velocidad, como si estuviese en una tubería inclinada. La inyección de aire se hace en una conexión "Y" a 45° a favor del flujo, observe esta descripción en la Figura 66.

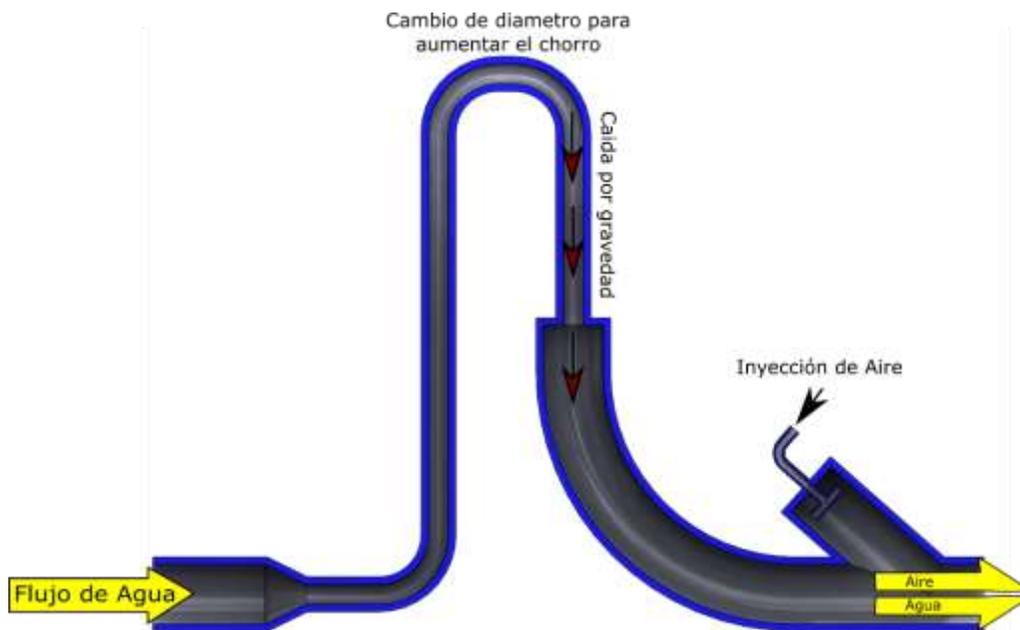


Figura 66 Propuesta base para inducir un flujo estratificado.
Fuente: Elaboración propia.

A consecuencia de que el flujo estratificado es laminar, es necesario evitar que el choque sea turbulento por el empuje del fluido, aprovechando la fuerza de gravedad y aceleración el fluido, acentuando la adherencia a la pared inferior interna de la tubería hacia un caudal estratificado.

La gravedad es quien realiza la mayor parte de trabajo en los flujos estratificados, es común ver este régimen de flujo en tuberías inclinados,

aunque, este dispositivo simulador entregará un flujo estratificado en una tubería horizontal.

4.8.2. Simulación de flujo CFD

La experimentación del diseño base se realiza en 2D en el software Fluent Ansys para un flujo bifásico de agua y aire por medio de CFD en el que se reduce el tubo a 1 pulgada, y asciende a una altura considerable para que descienda a un codo de 2 pulgadas de curvatura amplia. La prueba consiste en simular una matriz de 8 x 7, que da un total de 56 corridas de simulación a diversos caudales, definidos en la tabla modelada por Beggs and Brill y los resultados se muestra en la Figura 67 que se añade en el anexo (n).

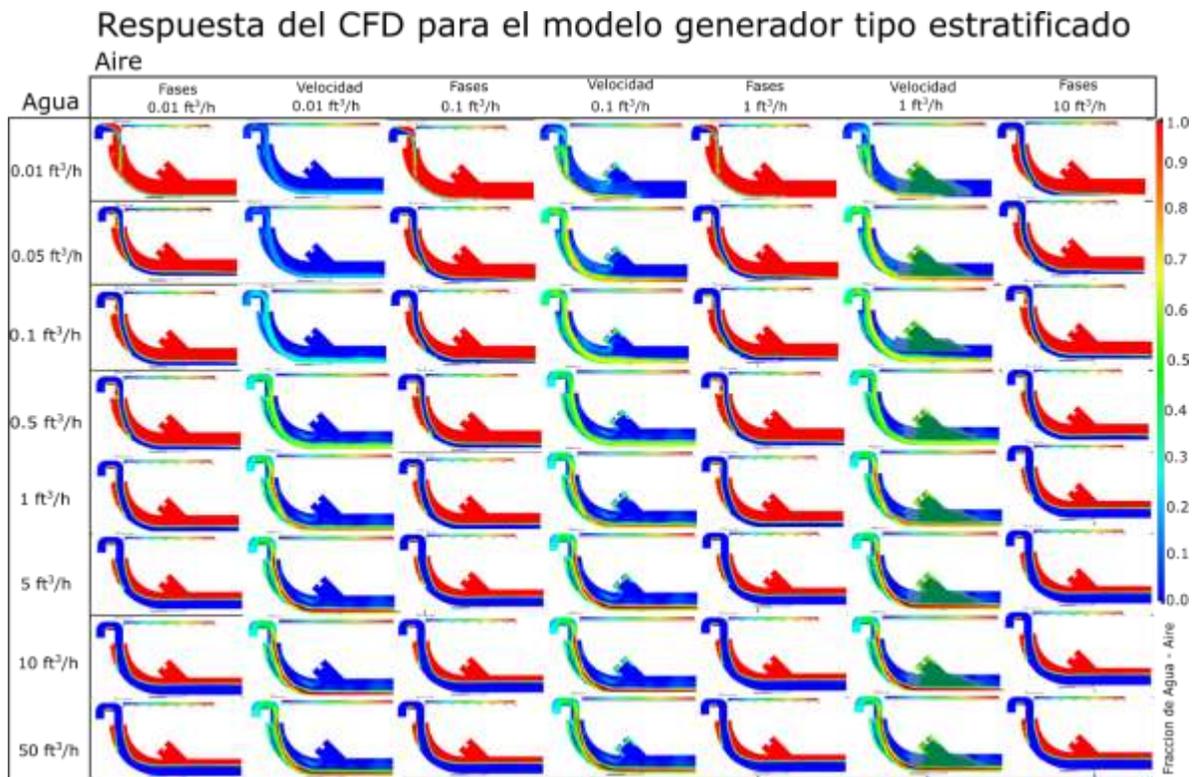


Figura 67 Resultados CFD para el generador estratificado (anexo n).

Fuente: Elaboración propia.

La escala gráfica de colores indica la fracción de agua y aire, es decir, la sección en color azul representa la fracción de agua y la sección en rojo representa la fracción de aire contenida.

La respuesta de la simulación indica que, se puede obtener un flujo estratificado en la mayor parte de toda la matriz, pero hay flujo que no es naturalmente un régimen estratificado, y se debe a las velocidades de flujo de agua son demasiado altas que las habituales.

Con lo cual podemos definir que es posible simular flujo estratificado en con el diseño básico presentado.

4.8.3. Comparación de resultados, respecto a Beggs and Brill

Mediante la observación se pueden distinguir cómo se distribuyen las fases y cómo se presentan sus características que definen al flujo tipo estratificado dentro de matriz gráfica de resultados CFD.

Los resultados de flujos son observados en la simulación corresponden a la tabla de Beggs and Brill en la Figura 68. Se observa que se forma un flujo estratificado en las zonas bajas de la prueba, que corresponden a lo establecido por el modelo de Beggs and Brill.

Respuesta del CFD para el modelo generador tipo estratificado

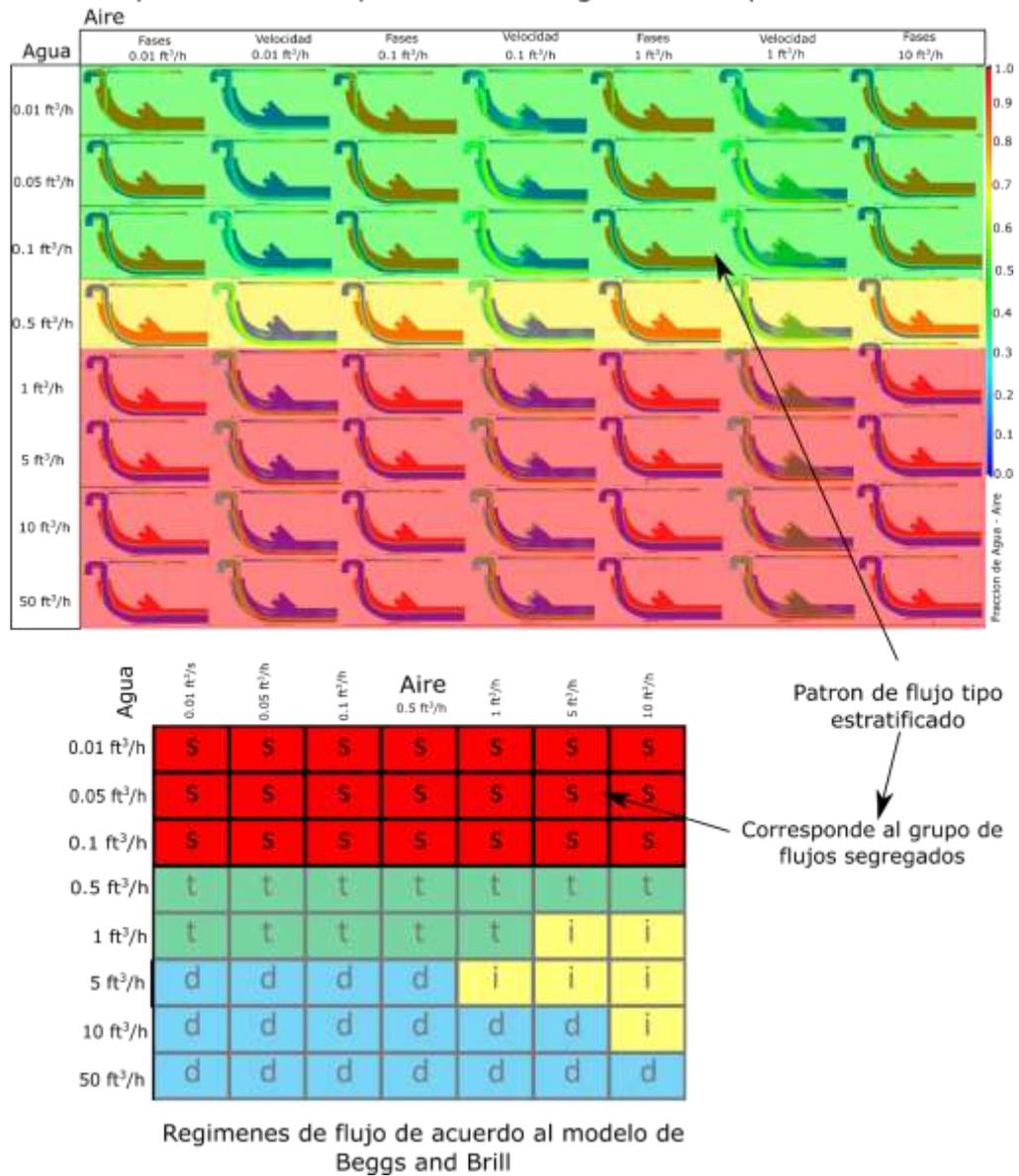


Figura 68 Comparación del CFD y Mapa de Beggs and Brill.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el mapa, la zona marcados en color verde corresponde a los resultados de la prueba por CFD que es propio del flujo tipo estratificado, y en amarillo aquellos en los cuales están en transición. Corresponden al grupo de flujo distribuido en el mapa de Beggs and Brill, y se puede concluir que es satisfactorio el uso de este diseño base para el desarrollo del simulador de flujo tipo estratificado.

Se describen los siguientes resultados durante la prueba.

Ventajas:

- Es posible generar un flujo tipo estratificado en una sección corta de tubería.
- Se requiere menor energía para inducir el flujo, volumen de agua, sección de tuberías menores.
- Es posible controlar la velocidad del flujo del líquido y del gas en la región estratificada
- Durante las pruebas de experimentación con flujo estratificado, se puede conocer el porcentaje de sustancia previamente al mezclar.

Recomendaciones:

- Es posible que en bajos niveles de flujo de agua la velocidad mínima sea la generada por la caída por gravedad al momento de introducir el agua.
- La inyección de aire en alto caudal puede ocasionar intermitencia y contraflujo del agua al momento de mezclar.

4.9. DISEÑO DEL SIMULADOR TIPO ESTRATIFICADO

4.9.1. Diseño final

Con base a los diseños básicos, los ajuste en función de los resultados de funcionalidad y una vez aceptada las características del flujo, se recrea el diseño a detalle de un carrete simulados de flujo tipo estratificado, el cual se muestra en la Figura 69.



Figura 69 Diseño final, carrito simulador de flujo estratificado.
Fuente: Elaboración propia.

La propuesta final queda presentada en las hojas de diseño y con el respectivo explotido añadido en el anexo (o) y (p) del documento, donde se indican las dimensiones de las partes y su ensamble. Este régimen se caracteriza por ser de baja velocidad, en el cual las sustancias viajan de modo separado, es decir el líquido viaja en la parte baja de la tubería y fase gaseosa se mantienen desplazándose en la parte superior. Figura 70

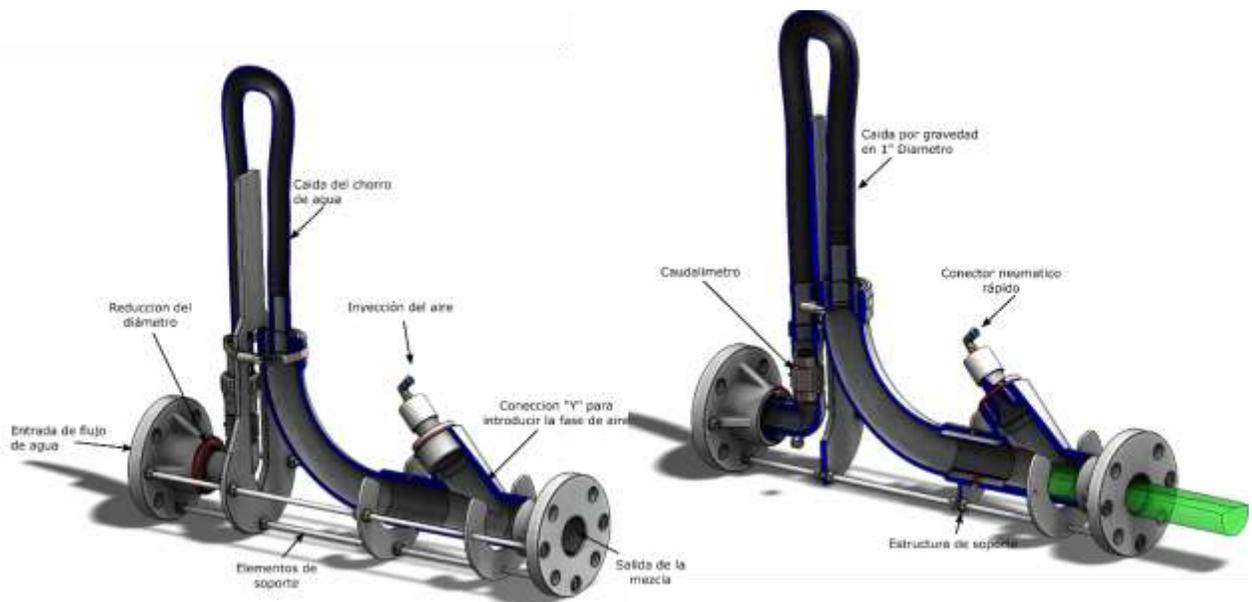


Figura 70 Características del carrito simulador de flujo estratificado.
Fuente: Elaboración propia.

Se diseña este carrete de flujo para aprovechar la fuerza de gravedad, debido a que la salida es para un flujo horizontal.

4.9.2. Modelado

A través del modelado 3D del flujo con una velocidad de entrada de líquido a 6 m/s y 3 m/s para aire; en la sección de corte se observa cómo se distribuye la presión dentro del carrete, y con líneas la corriente de chorro del agua, y descende por la pared del codo hasta la parte inferior de la tubería. Figura 71.

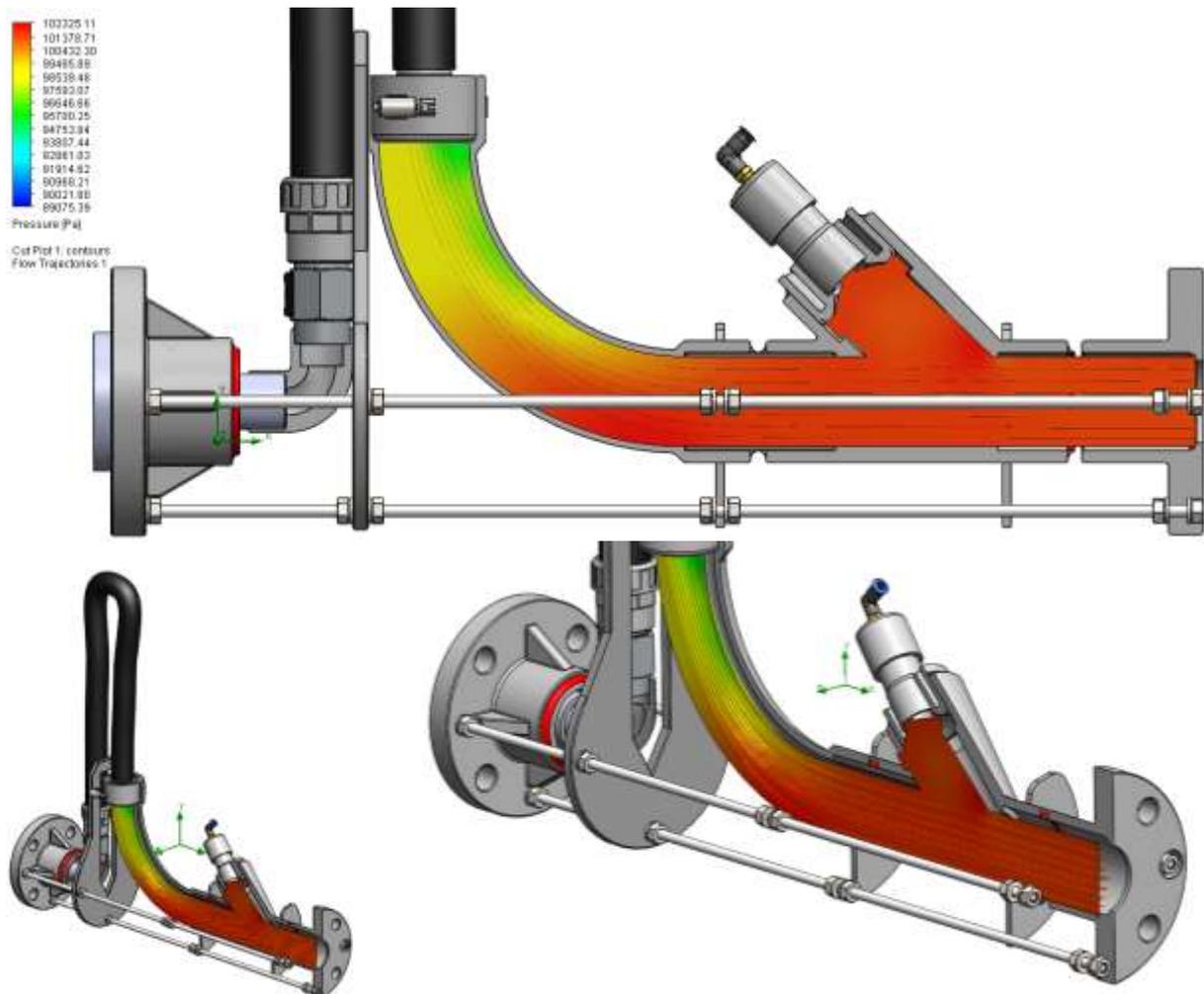


Figura 71 Modelado del carrete simulador de flujo tipo estratificado.
Fuente: Elaboración propia.

4.9.3. Límites de operación

Los límites de operación del sistema de acuerdo con el modelo CFD, que corresponden al grupo de regímenes segregados del mapa Beggs & Brill, las corrientes de flujo estratificado se pueden reproducir entre los flujos de fases descritos en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8 Límites de operación para simular flujo estratificado

| | Fase Líquida (agua) | Fase Gaseosa (aire) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| Límite Inferior | 0.01 ft ³ /h | 0.01 ft ³ /h |
| Límite Superior | 0.1 ft ³ /h | 10 ft ³ /h |

Los límites de operación son de acuerdo con la escala utilizada en la prueba CFD, y no dentro del mapa establecido por Beggs & Brill, el modelo CFD generador estratificado se observa en la Figura 72 en la escala de agua a 0.05 ft³/h y aire a 0.05 ft³/h.

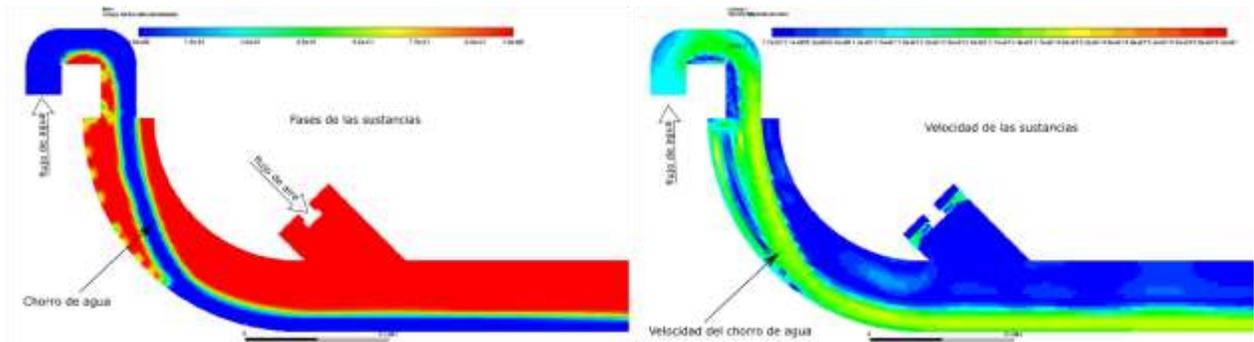


Figura 72 Generador estratificado con agua a 0.05 ft³/h y aire a 0.05 ft³/h.
Fuente: Elaboración propia.

4.9.4. Materiales y costos

El desarrollo del carrito simulador de flujo tipo estratificado, esta propuesto básicamente en tubería de PVC cédula 40, a un diámetro nominal de 2

pulgadas de diámetro, que de entrada se envía a una tubería flexible de 1" de diámetro que asciende, gira y aprovecha la fuerza de gravedad. Continuando en un codo amplio donde inicia a formarse un flujo segregado en el agua y aire. El componente electrónico utilizado es un medidor de caudal a 1 pulgada para captar el valor real del flujo, se estima este díselo con un costo de \$1 599.80, cuya lista de materiales se añade en el anexo (q) junto con las referencias a la página de los vendedores utilizados.

4.10. CASOS DE ESTUDIO

El simulador permitirá a los usuarios realizar pruebas experimentales con un sistema de 2" diámetro, sobre los efectos de los flujos multifásico en los sistemas de medición de flujo.

Es posible diseñar y probar dispositivos experimentales de medición no intrusivos, para identificar el régimen de flujo y la fracción de volumen de la sustancia.

Diseñar y probar dispositivos que eliminen la mayor cantidad de perturbaciones del flujo, delimitar sus alcances, o determinar reglas en el arreglo de tubería.

Caracterizar medidores en presencia de un solo régimen de flujo, establecer modelos matemáticos y las estrategias para reducir el impacto en la incertidumbre de las mediciones.

Permitirá la realización de presentaciones académica, presentaciones en foros, en ferias científicas sobre la importancia de la medición multifásico en la industria, observe la Figura 73.

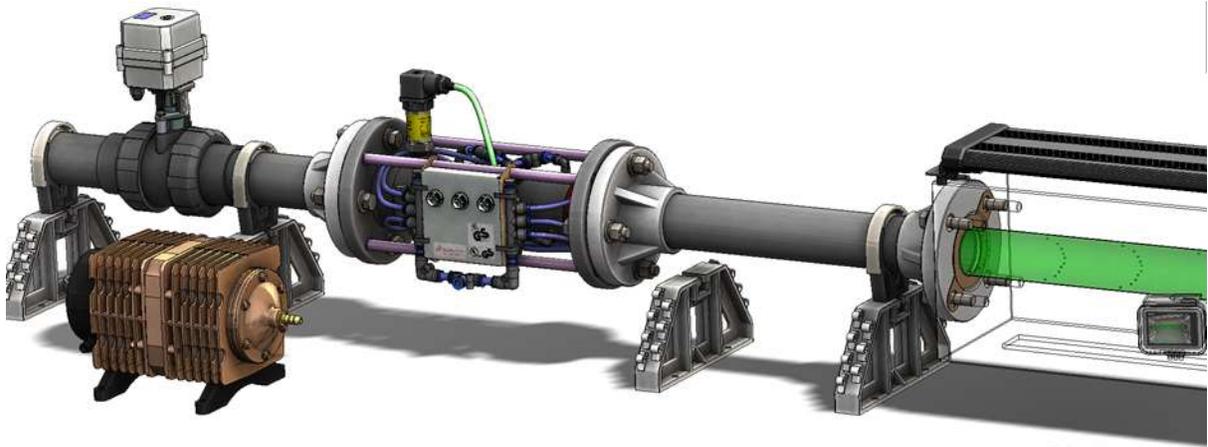


Figura 73 Propuesta del simulador multifásico con accesorios adicionales.
Fuente: Elaboración propia.

Permitirá demostrar el desempeño de todas las tecnologías de medición existentes, cómo placa de orificio, una turbina, tubo venturi, sistema v-con, desplazamiento positivo, ultrasónico, magnético, etc.; sometido a los diversos regímenes, condiciones de velocidad y presiones.

Ver la respuesta de la medición electrónica de un medidor cuando se el usuario administra el control de entrada de la mezcla.

Permitirá al usuario ser creativo en el diseño de nuevos modelos de medición multifásico, es decir (vertical, horizontal, uso de diversas técnicas de medición y caracterización, establecer límites de operación, modelos matemáticos, entre otros).

Elaborar anillos capacitivos para caracterizar una vista longitudinal de un régimen de flujo de modo no intrusivo en tiempo real. Ver ejemplo de la Figura 74.

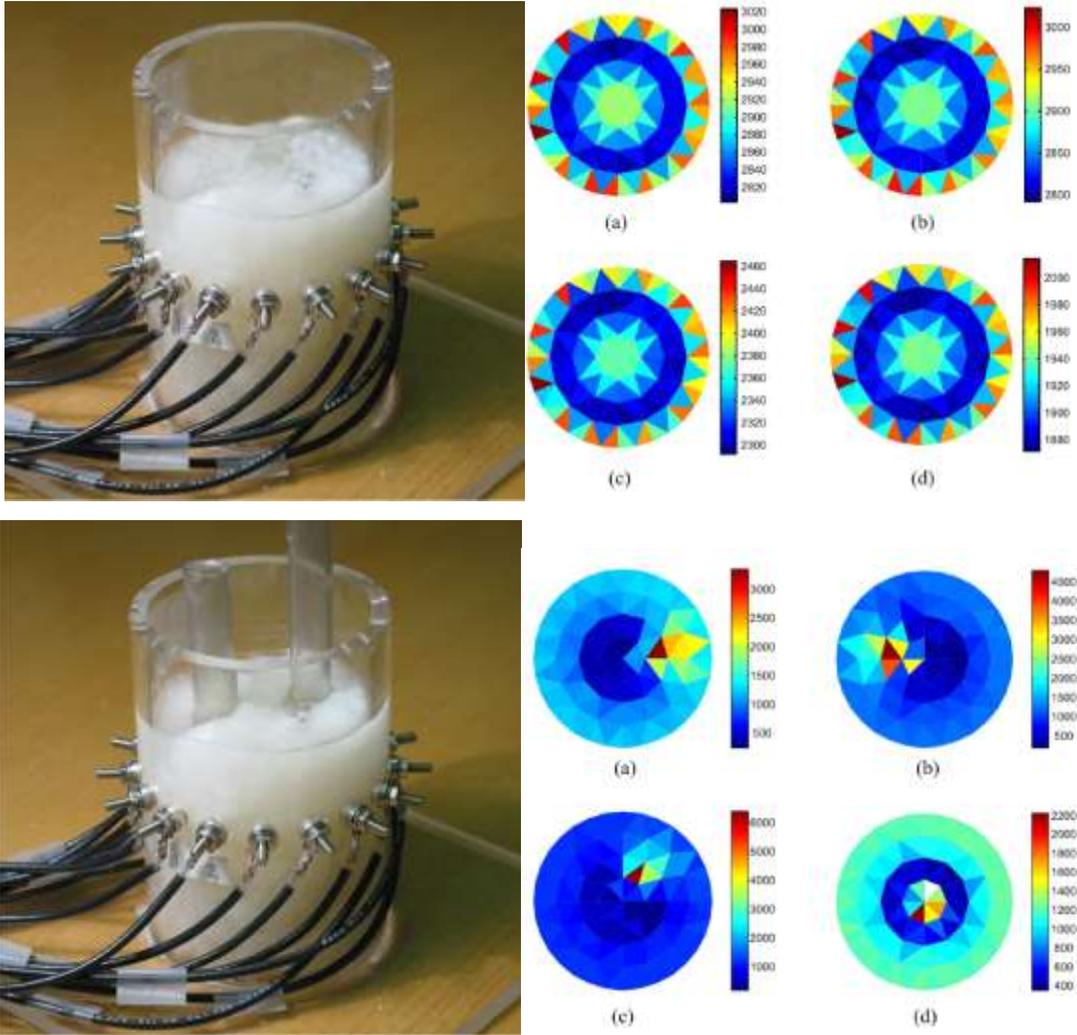


Figura 74 Modelo de caracterización de la Tampere University of Technology.
Fuente: Tampere University of Technology

CONCLUSIONES

La propuesta muestra el uso del proceso de manufactura para el desarrollo de un conjunto de dispositivos capaces de simular patrones multifásicos. a través la validación con herramientas virtuales para ratificar su funcionalidad, y trabajar en el modelo y construir virtualmente con especificaciones, que permitan ser de bajo costo, ensamblaje práctico, accesorios accesibles y poco mantenimiento.

La validación del diseño por medio de la simulación CFD permitió recrear la distribución de las sustancias cómo un patrón de flujo a través de un dispositivo de manera virtual, visualmente se confirma la congruencia de los mapas con los modelos actualmente aceptados En este documento se recrearon 4 simuladores (burbujas, anular, baches y estratificado) aun existiendo regímenes en horizontal cómo vertical.

Está propuesta es para ser parte de un patín de pruebas, disponible para el área de sistemas de medición en CIATEQ, llegar a ser un sistema de pruebas en universidades que se dediquen a la especialidad de sistemas hidráulicos, ingenieros petroleros, electrónicos, programación, entre otras carreras a fin.

En el proceso de manufactura se determinaron las especificaciones, estudio del arte, selección de materiales y estimación de los costos, con relativas ventajas sobre los equipos de simulación contruidos en México.

El mapa de Beggs and Brill, se tomó como base, por las características similares de las pruebas, es decir; se utilizó tubería de 2 pulgadas, con flujo de agua y aire, caracterizados y agrupados en 4 regiones poder englobar cómo la inclinación afecta a los flujos multifásico.

Las herramientas virtuales (CFD) permitieron establecer límites de operación tentativos para el desarrollo de los simuladores de flujo, así es posible reducir

los tiempos de fallas en la etapa de prototipado y producción dentro del proceso de manufactura.

El costo total estimado de la propuesta del simulador de flujo multifásico es de aproximadamente \$11,617.86 M/n Tabla 9 lo cual no implica que este sea el costo final total ya que el valor de los materiales fluctúa de acuerdo con su disponibilidad, a los costos de envío de cada elemento.

Tabla 9 Costo estimado del prototipo.

| Costo estimado del prototipo | |
|--|--------------|
| Costo de materiales del carrete de flujo tipo burbujas | \$ 3 963.05 |
| Costo de materiales del carrete de flujo tipo burbujas | \$ 2 880.33 |
| Costo de materiales del carrete de flujo tipo burbujas | \$ 3 174.68 |
| Costo de materiales del carrete de flujo tipo burbujas | \$ 1 599.80 |
| Total | \$ 11 617.86 |

APORTACIONES DE LA TESIS

El desarrollo de esta tesis proporcionó cuatro modelos de carretes mezcladores de flujo multifásico, para su construcción y utilización en los laboratorios de flujo de CIATEQ, e iniciar nuevas propuestas tecnológicas para el diseño de bancos de pruebas y casos de estudio a modo de investigación.

El diseño final de los carretes mezcladores fue llevada a través de la metodología de un proceso de manufactura, con el estado del arte, diseño conceptual, diseño de detalle, selección de materiales, experimentación virtual, correcciones del diseño y resultados final para construcción.

Se determinaron las ventajas y los beneficios que tendría el desarrollo final, se proponen las investigaciones de casos de estudio para medición de flujo multifásico.

Se indican las disciplinas que pueden participar en la fabricación y estudio de modo escolar, por ejemplo: la ingeniería hidráulica, sistemas de monitoreo y control de datos en tiempo real, e inclusive generar curso de capacitación para la industria petrolera cómo en el desempeño de la medición de fluidos, análisis de incertidumbre.

RECOMENDACIONES

Es posible reproducir las pruebas de simulación y obtener detalles físicos mecánicos, y mejorar las cualidades de los dispositivos simuladores de flujo multifásico.

Es posible determinar cualidades en el modelado CAM, cómo resistencia física, resistencia a la presión, a las vibraciones, temperaturas y estrés.

Es posible determinar en los modelos CFD el uso de modelos transitorios. Pero esto implica el uso de recursos de cómputo para el cálculo y gráficos.

Es posible realizar simulación 3D en CFD del modelo, pero requiere mayor tiempo de cálculo por la interacción de 3 dimensiones.

Los costos de los materiales pueden variar de acuerdo con cada país, vendedor, y durante el tiempo que transcurre.

Es posible que los resultados del CFD difieran entre el uso de diversos softwares especializados, el modelo matemático manejado, el mallado, las dimensiones del modelo, las condiciones de frontera, la versión del software, entre otros.

Hay recomendaciones particulares dentro de los resultados de cada simulador de flujo, estos dispositivos son perfectibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Instituto Mexicano del Petróleo. Centro de Tecnología para Aguas Profundas (CTAP) del Instituto Mexicano del Petróleo. Blog de artículos del Gobierno Federal. [En línea] Gobierno de México, 16 de julio de 2018. <https://www.gob.mx/imp/articulos/centro-de-tecnologia-para-aguas-profundas-ctap-del-instituto-mexicano-del-petroleo.%202018,%2016%20de%20julio%20de%202018>.

[2] Montero, Yamilet Sánchez, y otros. Método de determinación de patrones de flujo en tuberías verticales a través de lógica difusa. 4to Simposio Brasileño de Automatización Inteligente. 10 de Septiembre de 1999.

[3] Brennen, Christopher E. Fundamentals of Multiphase Flows. [ed.] Cambridge University Press. Pasadena, California : California Institute of Technology, 2008. 9780511807169.

[4] Vázquez García, José Mizraim. análisis del comportamiento del oleogasoducto de plataformas a la estación de separación y recolección punta de piedra por cambios en el ritmo de producción. es.scribd.com. [En línea] 07 de marzo de 2013. <https://es.scribd.com/document/343665149/vazquezgarciajosemizraim-pdf>.

[5] Petrirena, Francisco Garaichochea; Hicochea, Cesar Bernal; Ortiz, Oscar López. Transporte de Hidrocarburos por ductos. Scrib. [En línea] noviembre de 1983. <https://es.scribd.com/document/360245693/Apuntes-de-Transporte-de-Hidrocarburos-Francisco-Garaichochea-Petrirena-pdf>.

[6] Frictional Pressure Drop in Two-Phase Flow: B. An Approach Trough Similarity Analysis. Dukler, A. E. y Wick, Moye. [ed.] American Institute of Chemical Engineers. Cleveland : A.I.Ch.E. Journal, University of Houston, Junio de 1964. 690100118.

[7] kataoka; Isao; Serizawa; Akimi. Atomization and Sprays - Atomization Spray. Thermopedia.com. [En línea] 01 de 2006. [Citado el: 07 de septiembre de 2010.] <http://www.thermopedia.com/content/8/>.

[8] Albertovich, Zeigarnik Yuri. Annular flow. Thermopedia. [En línea] A, 01 de 2006. [Citado el: 03 de febrero de 2011.] <http://www.thermopedia.com/es/content/11/>.

[9] Alain, Liné; J., Fabre. Stratified gas liquid flow. Thermopedia. [En línea] 01 de 1997. [Citado el: 09 de febrero de 2011.] <http://www.thermopedia.com/content/266/.0849393566>.

[10] Sreenivas, Jayanti. Waves on Fluid and Fluid Interfaces. Thermopedia. [En línea] 11 de febrero de 2011. <http://www.thermopedia.com/content/269/>.

[11] J., Fabre; Alain, Liné. Slug Fow. Thermopedia.com. [En línea] 01 de enero de 1997. <http://www.thermopedia.com/content/38/.0849393566>.

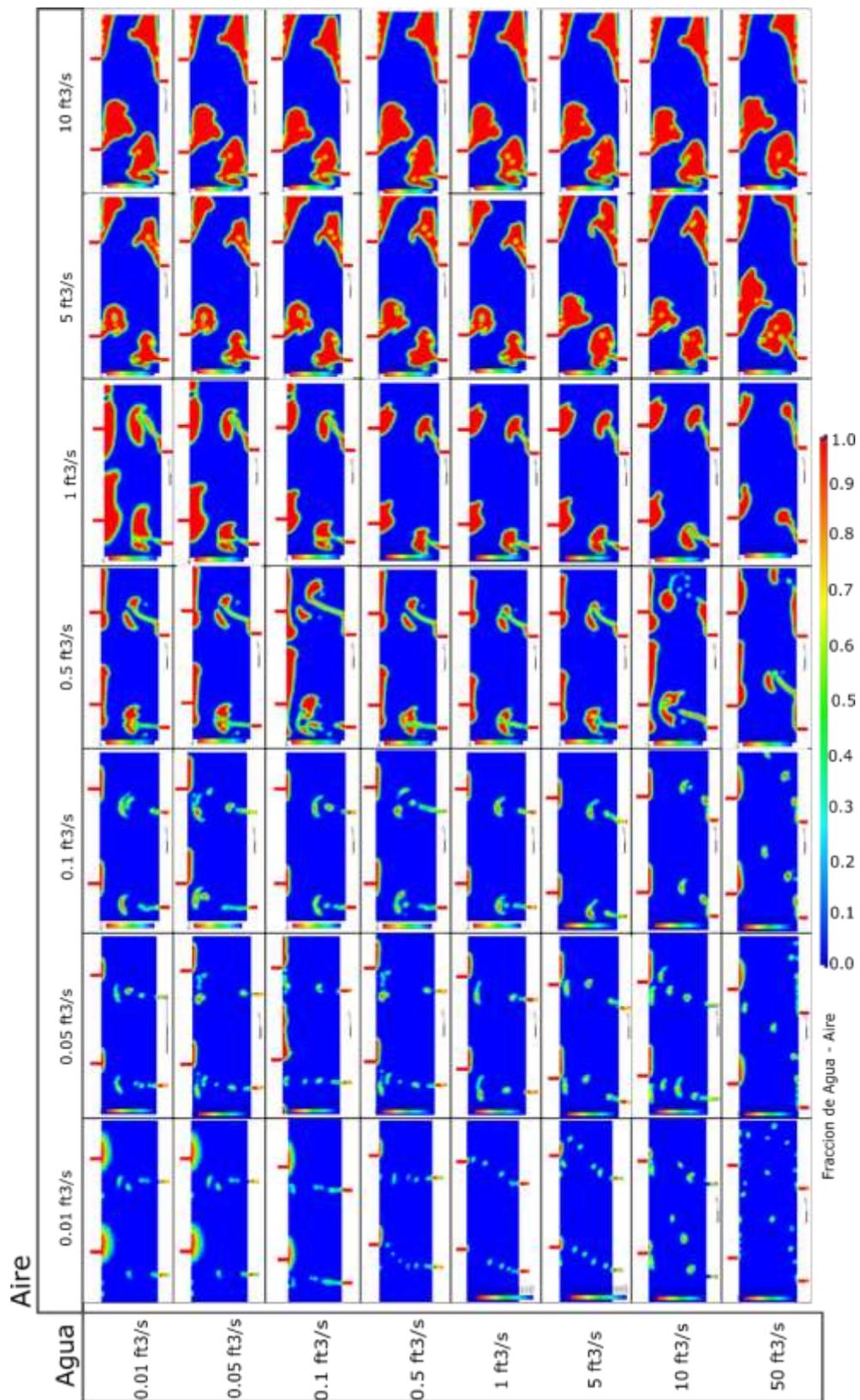
- [12] Tomimaya, Akio. Multiphase Science and Technology. [aut. libro] Jean-Marc Delhay, Hewitt Geoffrey y Novak Zuber. Multiphase Science and Technology. New York : Begell House, 2019.
- [13] Kuethe, Arnold M. y Chow, Chuen-Yen. Foundations of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design. EUA : University of Colorado at Boulder, University of Michigan, 1998. ISBN 0-471-12919-4.
- [14] Anderson, John David. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York : McGraw-Hill, Inc., 1995. 978-0070016859.
- [15] Mokhatab, Saeid, A. Poe, William y G. Speight, James. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Burlington Massachuset, EUA : Elsevier Inc., sep 1, 2017. 978-0-7506-7776-9.
- [16] SINTEF. SINTEF. www.sintef.no. [En línea] SINTEF. NO., 10 de julio de 2017. <https://www.sintef.no/en/all-laboratories/multiphase-flow-laboratory/>.
- [17] Institute for Energy Technology. Laboratory of Multiphasic Flow. <https://ife.no>. [En línea] IFE, 2018. <https://ife.no/en/laboratory/well-flow-loop-2/>.
- [18] Instituto Mexicano del Petróleo. Soluciones tecnológicas para optimizar los procesos de producción de hidrocarburos. Blog del Gobierno Federal. [En línea] Gobierno Federal, 31 de enero de 2013. <https://www.gob.mx/imp/articulos/soluciones-tecnologicas-para-optimizar-los-procesos-de-produccion-de-hidrocarburos>.
- [19] TUV-SUD. TUV-SUD. www.tuvnel.com. [En línea] Tuvnel, 2018. <http://www.tuvnel.com/>.
- [20] Fluid Control Research Institute. Fluid Control Research Institute. FCRI India. [En línea] Fluid Control Research Institute, 2017. <http://www.fcriindia.com/>.
- [21] The Michelsen Center. The Michelsen Center. Michelsencentre.com. [En línea] 19 de agosto de 2015. https://issuu.com/cmr.no/docs/the_michelsen_centre-final_report_u.
- [22] PROLAB NL. Prolab. www.prolabnl.com. [En línea] Prolab, 2014. <http://www.prolabnl.com/>.
- [23] Instituto Nacional de Tecnología Industrial. www.inti.gob.ar. INTI ProDiseño. [En línea] 01 de septiembre de 2009. https://www.inti.gob.ar/prodiseno/pdf/n141_proceso.pdf.

ANEXOS

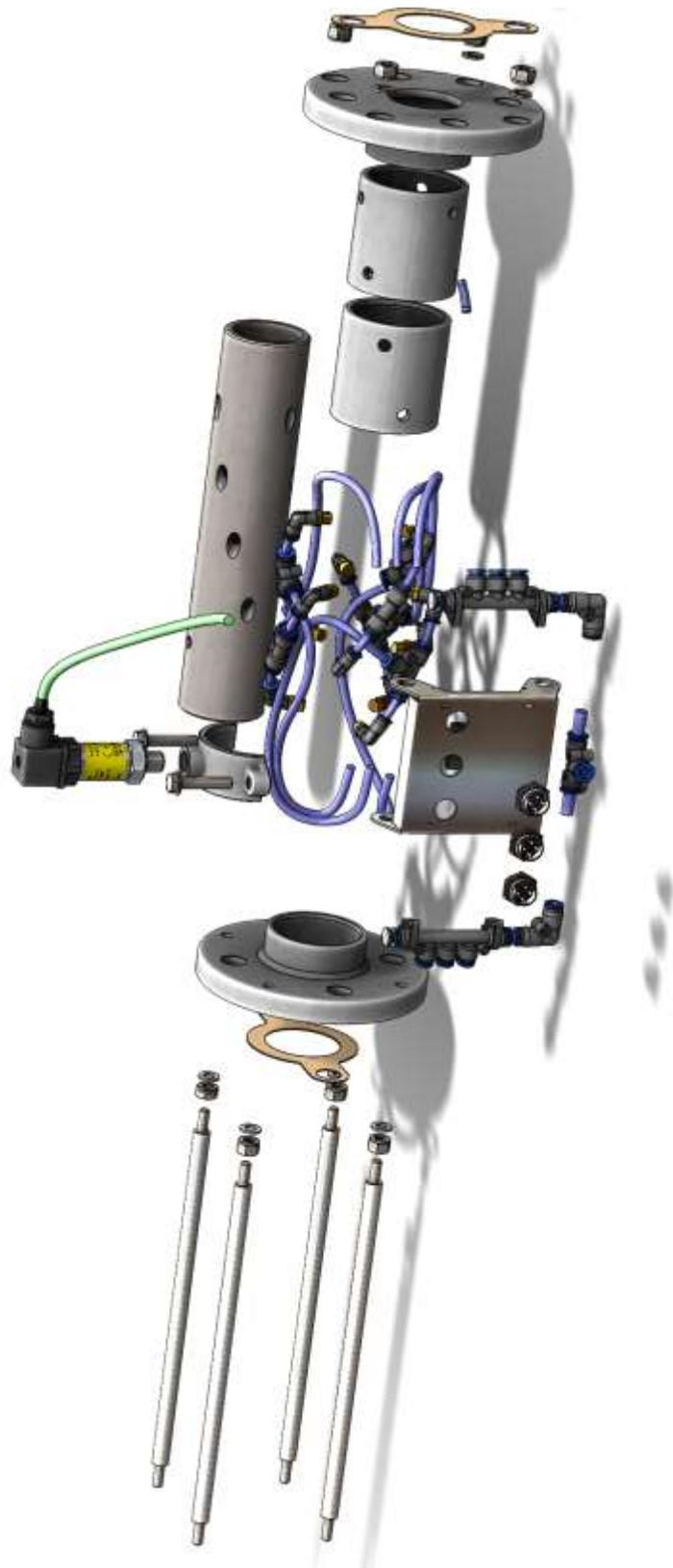
- a) Patín de pruebas de medición con placa de orificio del CENAM



b) Resultados de la simulación para el generador de flujo tipo burbujas



c) Presentación del explosionado del carrete de flujo tipo burbujas



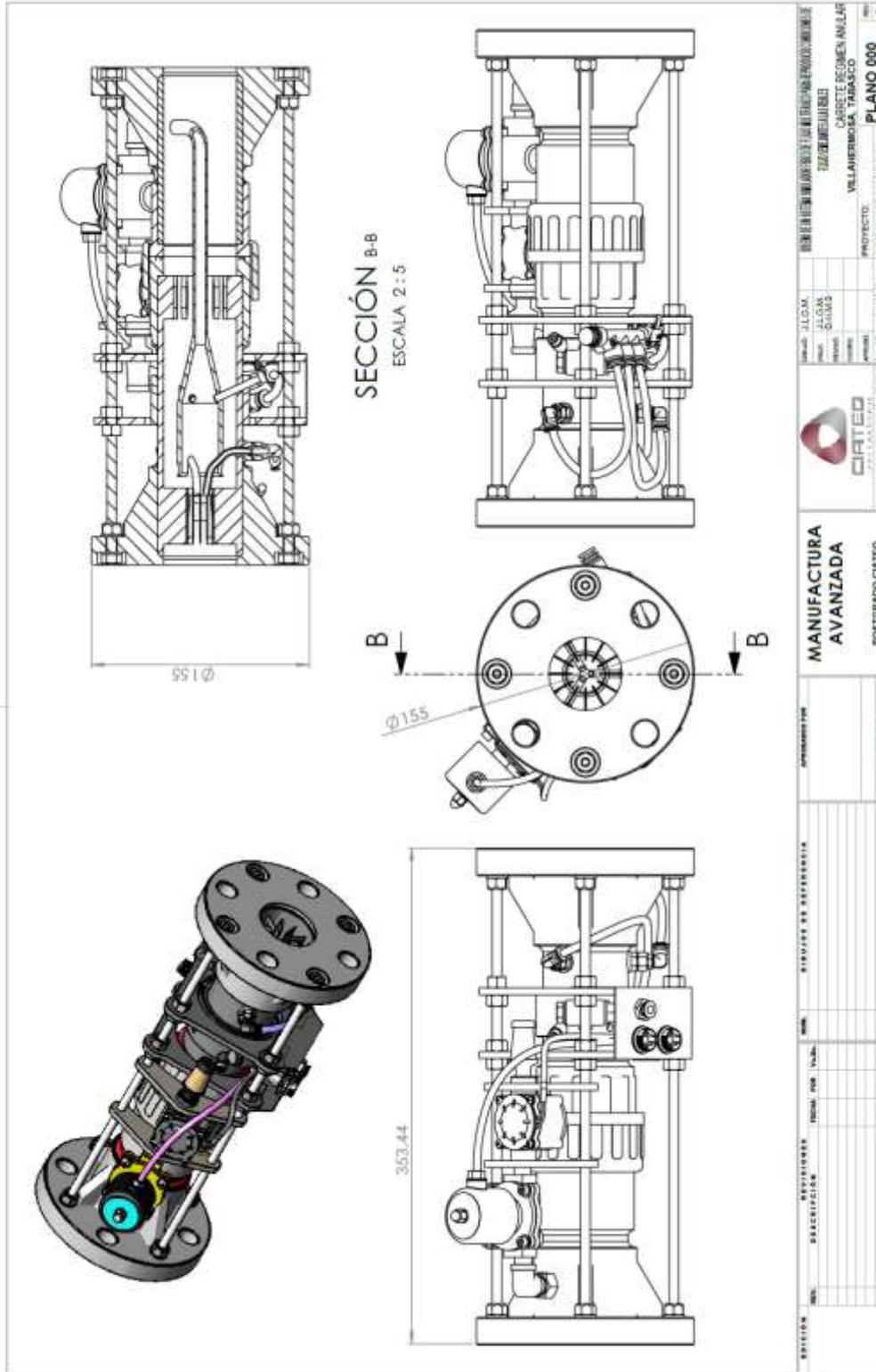
e) Costo de materiales del carrete de flujo tipo burbujas

| DISEÑO DE UN SIMULADOR FISICO DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO SEMEJANTES A LAS REALES | | | | | | |
|---|----------|---|----------------|-------------|---|-------------|
| Selección de Materiales para el diseño del Carrete Mezclador de Flujo Multifasico | | | | | | |
| Fecha | | COSTO TOTAL | | \$3,963.05 | | |
| No | Cantidad | Descripcion | Costo unitario | Costo Neto | Referencia | SUBTOTAL |
| 1 | 2 | Brida con manguito PVC DN63 | \$ 313.16 | \$ 626.32 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-g | \$ 626.32 |
| 2 | 0.1 | Tubo PVC presion PN10 gris rigido D50-D200 ND63 | \$ 790.45 | \$ 79.05 | http://www.poolaria.com.mx/tuberia-rigida-p | \$ 79.05 |
| 3 | 2 | Manguito union PVC cementar DN 63 | \$ 59.98 | \$ 119.96 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-g | \$ 119.96 |
| 4 | 15 | Arandela 8mm | \$ 0.79 | \$ 11.85 | https://www.grainger.com.mx/producto/FABO | \$ 11.85 |
| 5 | 8 | Tuerca hexagonal 8mm | \$ 0.70 | \$ 5.60 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRA | \$ 5.60 |
| 6 | 8 | Tornillo 8mm | \$ 17.74 | \$ 141.92 | https://www.grainger.com.mx/producto/TYAN | \$ 141.92 |
| 7 | 4 | Varilla esparrago 5/16" galvanizado | \$ 18.00 | \$ 72.00 | http://www.ferreyotla.com/productDetail.pl | \$ 72.00 |
| 8 | 0.1 | Tubing aluminio 10 mm | \$ 362.50 | \$ 36.25 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRA | \$ 36.25 |
| 9 | 1 | Collarín de toma DN63 | \$ 148.90 | \$ 148.90 | http://www.poolaria.com.mx/collarines-de-td | \$ 148.90 |
| 10 | 1 | Junta plana EVA DN63 | \$ 20.99 | \$ 20.99 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-g | \$ 20.99 |
| 11 | 4 | Arandela plana 1/2" PQ156 | \$ 1.60 | \$ 6.40 | https://www.grainger.com.mx/producto/CLAV | \$ 6.40 |
| 12 | 2 | Tuerca hexagonal, Acero 1/2"-13, | \$ 3.20 | \$ 6.40 | https://www.grainger.com.mx/producto/TYAN | \$ 6.40 |
| 13 | 2 | Tornillo Cab Dado Hex, 1/2"-13x1-1/4, | \$ 20.88 | \$ 41.76 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRA | \$ 41.76 |
| 14 | 12 | Union codo, tubo 3/8 pulg, Hex7/8 pulg | \$ 147.90 | \$ 1,774.80 | https://www.grainger.com.mx/producto/SMC | \$ 1,774.80 |
| 15 | 1 | Sensor de presion GTX56-56 | \$ 543.56 | \$ 543.56 | http://www.pressuresensorsuppliers.com/es/ | \$ 543.56 |
| 16 | 2 | Conector 5 Vías 6mm Mod PK6 | \$ 18.00 | \$ 36.00 | https://www.inyepartes.com/producto/conec | \$ 36.00 |
| 17 | 1 | Soporte para tuberia PVC DN 63 | \$ 43.39 | \$ 43.39 | http://www.poolaria.com.mx/collarines-de-td | \$ 43.39 |
| 18 | 4 | Conector neumatico rapido 1/4" | \$ 16.00 | \$ 64.00 | https://www.inyepartes.com/producto/conec | \$ 64.00 |
| 19 | 0.5 | Pegamento industrial | \$ 211.70 | \$ 105.85 | https://www.grainger.com.mx/producto/E600 | \$ 105.85 |
| 20 | 0.01 | Cable electrico cal.16 (100m) | \$ 805.00 | \$ 8.05 | http://www.homedepot.com.mx/electrico/ca | \$ 8.05 |
| 21 | 1 | Termocontraible de 1/8" | \$ 10.00 | \$ 10.00 | https://www.grainger.com.mx/producto/IDEA | \$ 10.00 |
| 22 | 1 | Conector 4 pines | \$ 60.00 | \$ 60.00 | https://sandrobotics.com/producto/hr0621b | \$ 60.00 |
| | | | \$ - | | | \$ - |

g) Presentación del explosionado del carrete de flujo tipo anular



h) Planos de diseño del carrete de flujo tipo anular

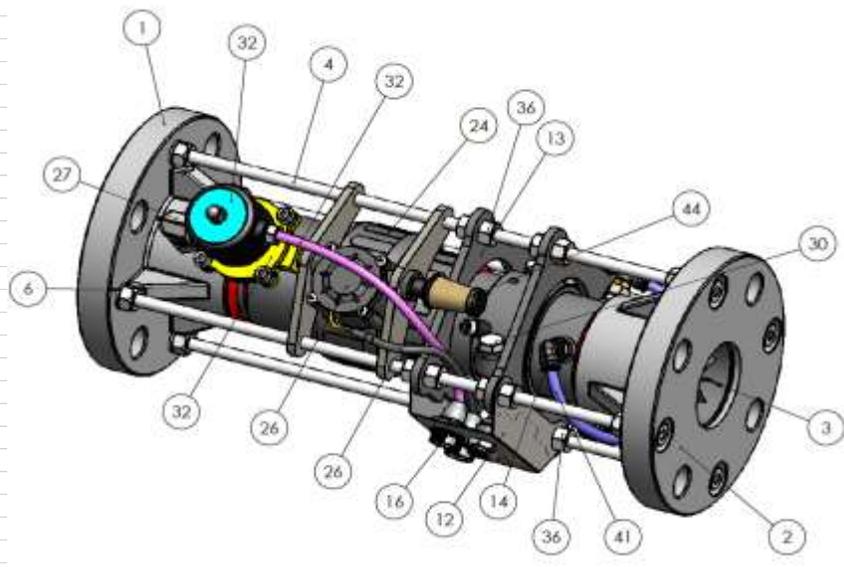


i) Costo de materiales del carrete de flujo tipo anular

DISEÑO DE UN SIMULADOR FISICO DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO SEMEJANTES A LAS REALES

Selección de Materiales para el diseño del Carrete Mezclador de Flujo Multifasico

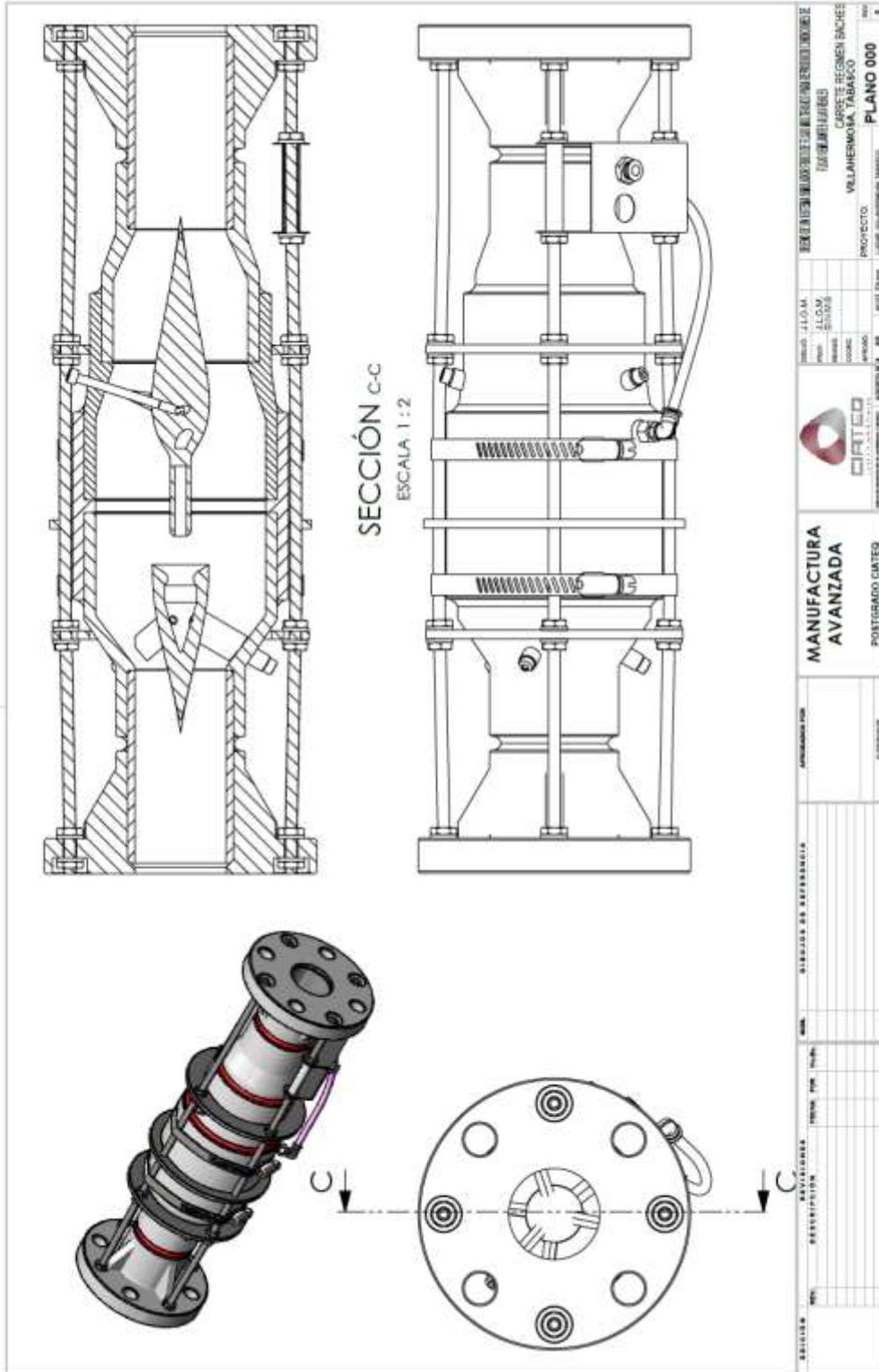
| Fecha | | COSTO TOTAL | | \$2,880.33 | | |
|-------|----------|--|----------------|------------|---|-----------|
| No | Cantidad | Descripcion | Costo unitario | Costo Neto | Referencia | SUBTOTAL |
| 1 | 2 | Brida con manguito PVC DN 63 | \$ 313.16 | \$ 626.32 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-f | \$ 626.32 |
| 2 | 1 | cinchos pvc | \$ 0.46 | \$ 0.46 | https://www.grainger.com.mx/producto/POW | \$ 0.46 |
| 3 | 0.03 | Tubo PVC presión PN10 gris rígido D50-D200 | \$ 790.45 | \$ 23.71 | http://www.poolaria.com.mx/tuberia-rigida-p | \$ 23.71 |
| 4 | 2 | Varilla esparrago 5/16" galvanizado | \$ 18.00 | \$ 36.00 | http://www.ferreyotla.com/productDetail.pl | \$ 36.00 |
| 5 | 16 | Arandela plana 1/2" PQ156 | \$ 1.60 | \$ 25.60 | https://www.grainger.com.mx/producto/CLAV | \$ 25.60 |
| 6 | 16 | Tuerca hexagonal 8mm | \$ 0.70 | \$ 11.20 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRAI | \$ 11.20 |
| 7 | 1 | Respiradero,1/2 NPT,7/8 pulg.Hexagonal | \$ 58.00 | \$ 58.00 | https://www.grainger.com.mx/producto/SPEE | \$ 58.00 |
| 8 | 0.5 | Pegamento industrial | \$ 211.70 | \$ 105.85 | https://www.grainger.com.mx/producto/E600 | \$ 105.85 |
| 9 | 3 | Aditamento d/Compresion,dia. 1/8 pulg. | \$ 147.90 | \$ 443.70 | https://www.grainger.com.mx/producto/TEM | \$ 443.70 |
| 10 | 3 | Junta plana EVA DN63 | \$ 20.99 | \$ 62.97 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-f | \$ 62.97 |
| 11 | 0.01 | Tubing inox 1/8 pulg. | \$ 977.30 | \$ 9.77 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRAI | \$ 9.77 |
| 12 | 0.3 | Placa Proteccn p/Puerta,An28pulg,S/Brillo (chapa de contactos) | \$ 922.20 | \$ 276.66 | https://www.grainger.com.mx/producto/ROC | \$ 276.66 |
| 13 | 2 | soporte plano de burbujeador, (lamina pvc 12" x12") | \$ 98.60 | \$ 197.20 | https://www.grainger.com.mx/producto/POL | \$ 197.20 |
| 14 | 4 | Conector rápido "L" racor 6mm x 1/4 | \$ 16.00 | \$ 64.00 | https://www.inyepartes.com/producto/conec | \$ 64.00 |
| 15 | 1 | Conector 5 Vías 6mm Mod PK6 | \$ 18.00 | \$ 18.00 | https://www.inyepartes.com/producto/conec | \$ 18.00 |
| 16 | 2 | Conector 4 pines | \$ 60.00 | \$ 120.00 | https://sandorobotics.com/producto/hr0621b | \$ 120.00 |
| 17 | 1 | electroválvula solenoide 1/2 | \$ 261.50 | \$ 261.50 | https://www.amazon.com.mx/normalmente-e | \$ 261.50 |
| 18 | 2 | soporte de electroválvula (lamina pvc) | \$ 98.60 | \$ 197.20 | https://www.grainger.com.mx/producto/POL | \$ 197.20 |
| 18 | 3 | Tornillo Cab Dado Hex, 1/2"-13x1-1/4, | \$ 20.88 | \$ 62.64 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRAI | \$ 62.64 |
| 20 | 0.01 | tubo pvc 1/2 (soporte tornillos) | \$ 179.80 | \$ 1.80 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRAI | \$ 1.80 |
| 21 | 1 | tapon neumatico | \$ 6.85 | \$ 6.85 | https://www.jinsa.com.mx/tapon/2645-epp06 | \$ 6.85 |
| 22 | 1 | enlace mixto 3 pieza 2pulg | \$ 174.30 | \$ 174.30 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-f | \$ 174.30 |
| 23 | 2 | Niple,Ros Am Ext,1/2 pulg.,12pulg.,40 | \$ 34.80 | \$ 69.60 | https://www.grainger.com.mx/producto/MUE | \$ 69.60 |
| 24 | 1 | Manguera neumática PU 6mm azul | \$ 27.00 | \$ 27.00 | https://www.inyepartes.com/producto/mang | \$ 27.00 |
| 25 | 3 | Conector macho tubing 1/8 | \$ 43.67 | \$ 131.01 | https://www.casamyers.com.mx/item/254065 | \$ 131.01 |
| 26 | 1 | medidor de flujo de aire 1/2 | \$ 220.00 | \$ 220.00 | https://www.amazon.com.mx/MagiDeal-Cont | \$ 220.00 |
| 27 | 1 | conector Codo Macho Hembra 1/2 | \$ 217.50 | \$ 217.50 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRAI | \$ 217.50 |
| 28 | 2 | Collarín de toma reforzado | \$ 148.09 | \$ 296.18 | http://www.poolaria.com.mx/collarines-de-tc | \$ 296.18 |
| 29 | 4 | Arandela 8mm | \$ 0.79 | \$ 3.16 | https://www.grainger.com.mx/producto/FAB0 | \$ 3.16 |
| 30 | 2 | Tornillo, M8, Longitud Rosca 45mm | \$ 4.30 | \$ 8.60 | https://www.grainger.com.mx/producto/FAB0 | \$ 8.60 |
| 31 | 20 | Tuerca M8 hexagonal | \$ 2.37 | \$ 47.40 | https://www.grainger.com.mx/producto/TYAN | \$ 47.40 |
| | | | \$ - | \$ - | | \$ - |



k) Presentación del explosionado del carrete de flujo tipo baches



l) Planos de diseño del carrete de flujo tipo bache



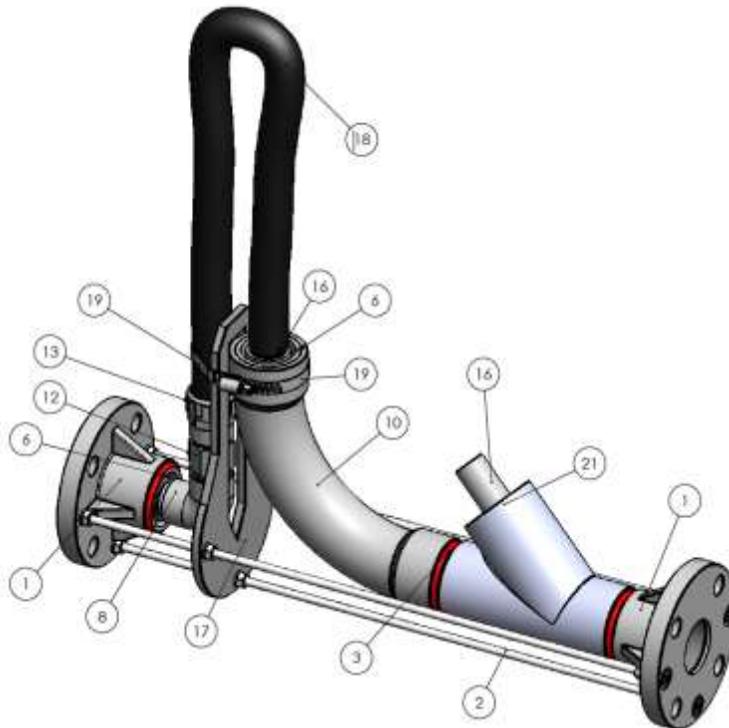
| | | | | | | | | | |
|---|-----|------------|-------|-----|-------|----------|----------|---|-------|
| SECCION | NO. | REVISIONES | FECHA | POR | HECHO | REVISADO | APROBADO | PROYECTO | PLANO |
| | | | | | | | | | |
| <p>MANUFACTURA AVANZADA</p> <p>POSTGRADO CIATEQ</p> | | | | | | | | <p>PROYECTO: VILLAHERMOSA, TABASCO</p> <p>PLANO 000</p> | |
| <p>MANUFACTURA AVANZADA</p> <p>POSTGRADO CIATEQ</p> | | | | | | | | <p>PROYECTO: VILLAHERMOSA, TABASCO</p> <p>PLANO 000</p> | |

m) Costo de materiales del carrete de flujo tipo baches

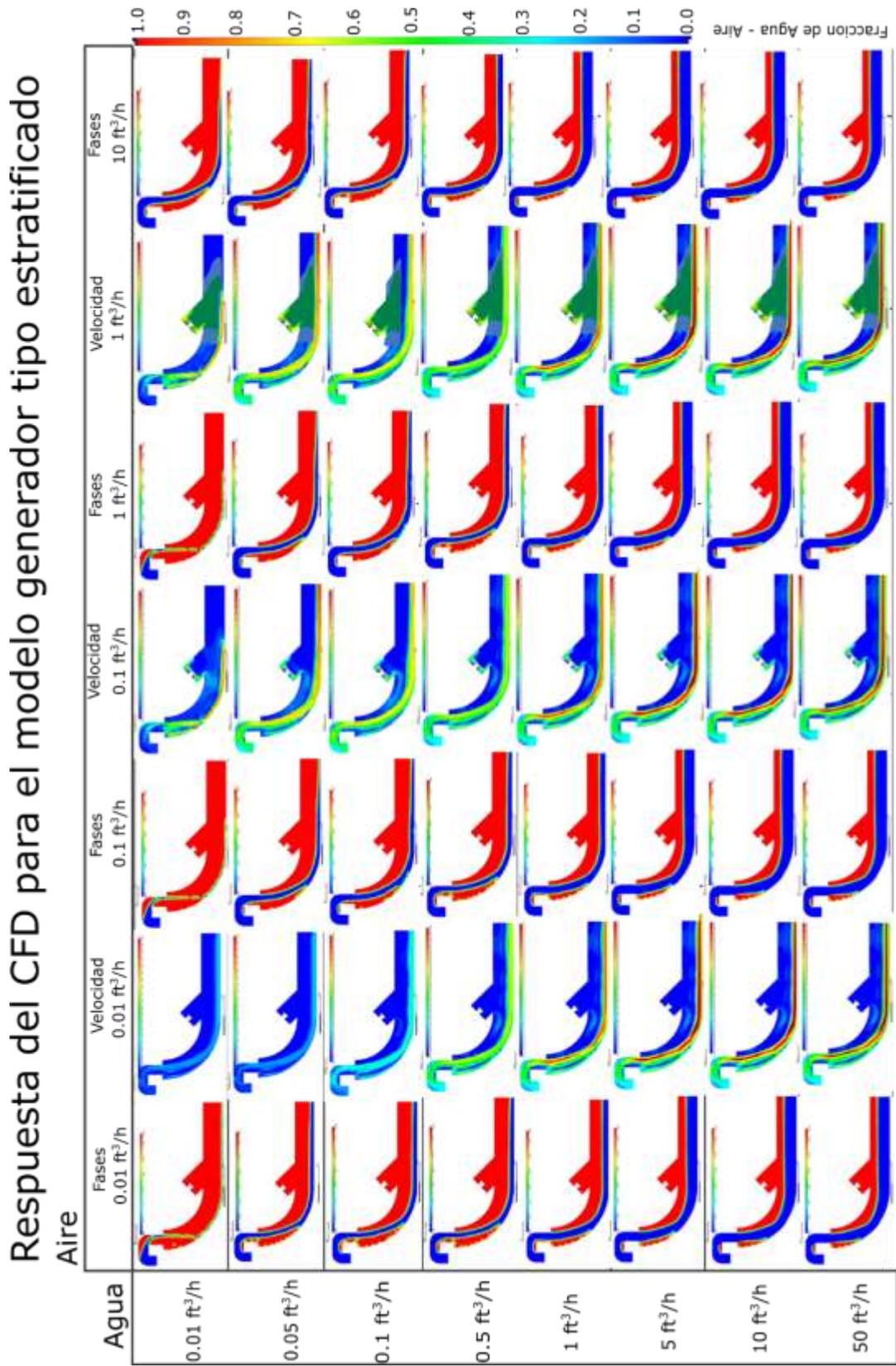
DISEÑO DE UN SIMULADOR FISICO DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO SEMEJANTES A LAS REALES

Selección de Materiales para el diseño del Carrete Mezclador de Flujo Multifasico

| Fecha | | COSTO TOTAL | | \$1,599.80 | | |
|-------|----------|--|----------------|------------|---|-----------|
| No | Cantidad | Descripcion | Costo unitario | Costo Neto | Referencia | SUBTOTAL |
| 1 | 2 | Brida con manguito PVC DN 63 | \$ 313.16 | \$ 626.32 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de- | \$ 626.32 |
| 2 | 3 | Varilla esparrago 5/16" galvanizado | \$ 18.00 | \$ 54.00 | http://www.ferreayotla.com/productDetail.ph | \$ 54.00 |
| 3 | 0.5 | PEGAMENTO INDUSTRIAL | \$ 211.70 | \$ 105.85 | https://www.grainger.com.mx/producto/E600 | \$ 105.85 |
| 4 | 16 | Arandela 8mm | \$ 0.79 | \$ 12.64 | https://www.grainger.com.mx/producto/FAB0 | \$ 12.64 |
| 5 | 16 | Tuerca hexagonal 8mm | \$ 2.37 | \$ 37.92 | https://www.grainger.com.mx/producto/TYAN | \$ 37.92 |
| 6 | 2 | Casquillo reduccion PVC cementar 50 X 32 | \$ 32.64 | \$ 65.28 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de- | \$ 65.28 |
| 7 | 0.01 | Tubo PVC presión PN10 gris rígido 62 D50-D200 | \$ 790.45 | \$ 7.90 | http://www.poolaria.com.mx/tuberia-rigida-p | \$ 7.90 |
| 8 | 0.01 | Tubo PVC presión PN16 gris rígido 32 D25-D32 | \$ 265.28 | \$ 2.65 | http://www.poolaria.com.mx/tuberia-rigida-p | \$ 2.65 |
| 9 | 1 | Codo 90° PVC cementar 32 | \$ 26.59 | \$ 26.59 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de- | \$ 26.59 |
| 10 | 1 | manguito union pvc cementar 32 | \$ 25.18 | \$ 25.18 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de- | \$ 25.18 |
| 11 | 1 | codo Curva 90º PVC cementar 63 | \$ 250.49 | \$ 250.49 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de- | \$ 250.49 |
| 12 | 1 | Sensor De Flujo Medidor | \$ 266.83 | \$ 266.83 | https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-6 | \$ 266.83 |
| 13 | 2 | Espiga PVC conexión 32 | \$ 16.87 | \$ 33.74 | https://www.poolaria.com/accesorios-de-pvc | \$ 33.74 |
| 14 | 1 | conexion manguera manguito carrete 5 | \$ 27.00 | \$ 27.00 | https://www.inyepartes.com/producto/mang | \$ 27.00 |
| 15 | 1 | Abrazadera de Manguera,181 mm dia.,Acero 7pulg | \$ 17.40 | \$ 17.40 | https://www.grainger.com.mx/producto/SUR | \$ 17.40 |
| 16 | 1 | Manguera Hidráulica 1 pulg | \$ 40.00 | \$ 40.00 | https://www.grainger.com.mx/producto/EATC | \$ 40.00 |



n) Resultados de la simulación para el generador de flujo tipo estratificado



o) Presentación del explosionado del carrete de flujo tipo estratificado



a) Costo de materiales del carrete de flujo tipo estratificado

DISEÑO DE UN SIMULADOR FISICO DE FLUJO MULTIFÁSICO PARA REPRODUCIR CONDICIONES DE FLUJO SEMEJANTES A LAS REALES

Selección de Materiales para el diseño del Carrete Mezclador de Flujo Multifasico

| Fecha | | COSTO TOTA | | \$3,174.68 | | |
|-------|--------------|---|-------------------|---------------|---|-----------|
| No | Cantida d | Descripcion | Costo unitario | Costo Neto | Referencia | SUBTOTAL |
| 1 | 2 | soporte plano de burbujeador, (lamina pvc 12" x12") | \$ 98.60 | \$ 197.20 | https://www.grainger.com.mx/producto/POL | \$ 197.20 |
| 2 | 0.03 | Tubo PVC presión PN10 gris rígido D50-D200 | \$ 790.45 | \$ 23.71 | http://www.poolaria.com.mx/tuberia-rigida-p | \$ 23.71 |
| 3 | 1 | reduccion conica 75x63 | \$ 115.16 | \$ 115.16 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-p | \$ 115.16 |
| 4 | 1 | reduccion conica 90x63 | \$ 204.48 | \$ 204.48 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-p | \$ 204.48 |
| 5 | 1 | manguito cople de 110 | \$ 239.68 | \$ 239.68 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-p | \$ 239.68 |
| 6 | 1 | reduccion conica 75x90 | \$ 115.16 | \$ 115.16 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-p | \$ 115.16 |
| 7 | 0.5 | pegamento industrial | \$ 211.70 | \$ 105.85 | https://www.grainger.com.mx/producto/E600 | \$ 105.85 |
| 8 | 4 | Varilla esparrago 5/16" galvanizado | \$ 18.00 | \$ 72.00 | http://www.ferreayotla.com/productDetail.pl | \$ 72.00 |
| 9 | 36 | Arandela 8mm | \$ 0.79 | \$ 28.44 | https://www.grainger.com.mx/producto/FAB0 | \$ 28.44 |
| 10 | 36 | Tuerca M8 hexagonal | \$ 2.37 | \$ 85.32 | https://www.grainger.com.mx/producto/TYAM | \$ 85.32 |
| 11 | 2 | disco guía varilla esparrago pvc (lamina pvc) | \$ 98.60 | \$ 197.20 | https://www.grainger.com.mx/producto/POL | \$ 197.20 |
| 12 | 0.3 | cono carrete 4 (Placa Proteccn p/Puerta,An28plg,S/Brillo) | \$ 922.20 | \$ 276.66 | https://www.grainger.com.mx/producto/ROC | \$ 276.66 |
| 13 | 6 | Tornillo Cab Dado Hex m5 | \$ 20.88 | \$ 125.28 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRA | \$ 125.28 |
| 14 | 0.1 | tubo pvc 1/2 (12 pz soporte tornillos) | \$ 179.80 | \$ 17.98 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRA | \$ 17.98 |
| 15 | 0.3 | IMPULSOR DE BURBUJAS CARRETE (Placa Proteccn p/Puerta,An28plg,S/Brillo) | \$ 922.20 | \$ 276.66 | https://www.grainger.com.mx/producto/ROC | \$ 276.66 |
| 16 | 2 | CONECTOR MACHO tubing 1/8 | \$ 43.67 | \$ 87.34 | https://www.casamyers.com.mx/item/254063 | \$ 87.34 |
| 17 | 2 | Conector rápido "L" racor 6mm x 1/4 | \$ 16.00 | \$ 32.00 | https://www.inyepartes.com/producto/conec | \$ 32.00 |
| 18 | 2 | Abrazadera de Manguera,181 mm dia.,Acero 7pulg | \$ 17.40 | \$ 34.80 | https://www.grainger.com.mx/producto/SUR | \$ 34.80 |
| 19 | 0.3 | Placa Proteccn p/Puerta,An28plg,S/Brillo (chapa de contactos) | \$ 922.20 | \$ 276.66 | https://www.grainger.com.mx/producto/ROC | \$ 276.66 |
| 20 | 0.01 | Tubing inox 1/8 pulg. | \$ 977.30 | \$ 9.77 | https://www.grainger.com.mx/producto/GRA | \$ 9.77 |
| 21 | 1 | Manguera neumática PU 6mm azul | \$ 27.00 | \$ 27.00 | https://www.inyepartes.com/producto/mang | \$ 27.00 |
| 23 | 2 | Brida con manguito PVC DN63 | \$ 313.16 | \$ 626.32 | http://www.poolaria.com.mx/accesorios-de-p | \$ 626.32 |

